

Статья: Orch OR у растений — гипотеза Боше–Пенроуза

Рабочее название (русское): «Квантовые механизмы раздражимости растений: гипотеза об Orch OR в микротрубочках как общебиологическом субстрате»

Рабочее название (английское): "Quantum Mechanisms of Plant Irritability: The Bosc–Penrose Hypothesis of Orch OR in Microtubules as a Universal Biological Substrate"

Тип: Теоретическая гипотеза / Обзор с авторской концепцией **Позиция автора:** Independent Researcher

«Не то, что мните вы, природа: Не слепок, не бездушный лик — В ней есть душа, в ней есть свобода, В ней есть любовь, в ней есть язык» — Ф.И. Тютчев, 1836

Аннотация (русская)

Летучие анестетики — хлороформ, диэтиловый эфир, ксенон — обратимо подавляют раздражимость растений с тем же дозозависимым профилем, что и сознание животных. Этот феномен, детально задокументированный Джагадишем Чандрой Боше (1913–1926) и независимо воспроизведённый в рецензируемых журналах спустя 92 года [Yokawa et al., 2018], лишён механистического объяснения: у растений нет ни нейронов, ни синапсов — классических мишеней летучих анестетиков.

Настоящая работа предлагает объяснение — **гипотезу Боше–Пенроуза**: летучие анестетики подавляют раздражимость растений через тот же молекулярный механизм, что и сознание животных, — через связывание с гидрофобными карманами тубулина и нарушение квантовых суперпозиций конформационных состояний белка согласно теории оркестрованной объективной редукции (Orch OR; Пенроуз и Хаммероф, 1996). Гипотеза опирается на три независимые доказательные линии. Первая: механизм действия анестетиков специфичен к белковым гидрофобным карманам, а не к липидным мембранам — неиммобилайзеры, стереоизомеры и эксперименты с очищенной люциферазой однозначно указывают на белковую мишень [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Вторая: гидрофобные карманы тубулина эволюционно консервативны и структурно идентичны у растений и животных, что доказывается одинаковой эффективностью колхицина, таксола и нокодазола в обоих таксонах [Morejohn, 1991]. Третья: летучие

анестетики изменяют коллективные ТГц-колебания тубулина пропорционально клинической мощности [Craddock et al., 2017], а стабилизатор микротрубочек эпотилон В задерживает потерю сознания у крыс [Pal et al., 2024].

Принципиально, что растительная клетка лишена ГАМК-А-рецепторов, NMDA-рецепторов, опиоидных рецепторов и иных нейронных мишеней анестетика — это делает тубулин фактически единственным молекулярным кандидатом и превращает растение в более чистую модельную систему для тестирования тубулинового механизма, чем нейронная ткань.

Дополнительно показано, что пять феноменов Боше образуют **иерархию четырёх уровней памяти** — от ультракратковременной интеграции стимулов (миллисекунды, суммация) через кратковременную память состояния (правило двух касаний Venus flytrap, ~30 с) и регуляторную память возбудимости (усталость, минуты–часы) до долговременной памяти (габитуация, 28 дней [Gagliano et al., 2014]). Правило двух касаний Venus flytrap формализуется как задача распределённого консенсуса без центрального узла — пространственная суммация без нейронной сомы. Субстрат каждого уровня памяти не установлен; спиновые состояния тубулина (CISS-эффект) рассматриваются как открытая гипотеза о едином носителе информации всей иерархии.

Гипотеза формулирует шесть проверяемых предсказаний, охватывающих молекулярный, биофизический, поведенческий и оптический уровни анализа, — каждое фальсифицируемо независимо. Если гипотеза верна, нейрон является не уникальным субстратом квантовых вычислений, а его эволюционной специализацией; граница сознания в природе — количественная, а не онтологическая.

Abstract (английский)

Volatile anesthetics reversibly suppress plant irritability — action potentials, habituation, and stimulus summation — with the same dose-dependent profile as in animal nervous tissue. This observation, documented by Jagadish Chandra Bose (1913–1926) and independently confirmed in peer-reviewed journals [Yokawa et al., 2018], lacks a mechanistic explanation: plants possess neither neurons nor synapses, the classical targets of anesthetic action.

We propose the **Bose–Penrose hypothesis**: volatile anesthetics suppress plant irritability through the same molecular mechanism as animal anesthesia — binding to hydrophobic pockets within tubulin, disrupting quantum superpositions of tubulin conformational states

as proposed by Orchestrated Objective Reduction (Orch OR; Penrose & Hameroff, 1996). Three independent lines of evidence support this claim. First, plant tubulin shares ~75% sequence homology with animal tubulin, and hydrophobic pocket geometry is evolutionarily conserved, as demonstrated by identical efficacy of colchicine, taxol, and nocodazole across plant and animal microtubules [Morejohn, 1991]. Second, the molecular mechanism of anesthetic action is specific to protein hydrophobic pockets, not lipid membranes: non-immobilizer compounds with high lipophilicity lack anesthetic activity; stereoisomers differ in potency; purified luciferase is inhibited by volatile anesthetics in the complete absence of membranes [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Third, volatile anesthetics alter collective THz oscillations of tubulin proportionally to clinical potency [Craddock et al., 2017], and the microtubule stabilizer epothilone B delays anesthetic-induced unconsciousness in rats [Pal et al., 2024].

Furthermore, Bose's five phenomena constitute a **four-level memory hierarchy** spanning milliseconds to weeks — temporal summation (ms), Venus flytrap two-touch rule (~30 s), fatigue (min–h), and habituation (28 days [Gagliano et al., 2014]) — implemented entirely without neurons. The Venus flytrap two-touch rule is analyzed as a distributed quorum-detection problem: spatial summation across physically separated trigger hairs without a central integrating node. These observations make plants a uniquely clean model for studying the physical substrate of biological memory, precisely because the absence of neurons eliminates competing mechanisms.

Critically, plant cells offer a methodological advantage unavailable in neurons: they lack GABA-A receptors, NMDA receptors, opioid receptors, and other classical neuronal anesthetic targets. Tubulin is thus virtually the exclusive molecular candidate for anesthetic action in plant cells — making plants a *cleaner* model system for testing the tubulin mechanism than neurons themselves.

The hypothesis implies that neurons are not the unique substrate of quantum computation, but an evolutionary specialization of a mechanism universal to all eukaryotes. We formulate six testable predictions spanning molecular, biophysical, behavioral, and optical levels of analysis: (1) affinity of volatile anesthetics for plant tubulin predicts potency of irritability suppression; (2) *Arabidopsis thaliana* CRISPR mutants with modified hydrophobic pockets show altered anesthetic sensitivity; (3) plant microtubules exhibit a scale-invariant resonance hierarchy analogous to that described for neural microtubules; (4) microtubule-disrupting agents impair habituation in *Mimosa pudica*; (5) terpenoid microtubule stabilizers enhance, rather than suppress, plant irritability; (6) volatile anesthetics alter birefringence of microtubule networks in living plant cells, detectable by polarization microscopy without fluorescent labeling. None of these experiments have been performed. Their results — in either direction — will advance understanding of the molecular basis of eukaryotic irritability and may reframe the question of where, in the

continuous spectrum of living matter, quantum computation begins.

Ключевые слова

EN: Orch OR, plant irritability, microtubules, anesthetics, tubulin, quantum biology, Bose, Hameroff, Penrose, proto-consciousness, eukaryotic irritability, quantum coherence

RU: Orch OR, раздражимость растений, микротрубочки, анестетики, тубулин, квантовая биология, Боше, Хаммерофф, Пенроуз

1. Введение

Летучие анестетики — хлороформ, диэтиловый эфир, ксенон — обратимо подавляют раздражимость растений. Это наблюдение, детально задокументированное Джагадишем Чандрой Боше в серии работ 1913–1926 годов [Bose, 1913; 1926], остаётся без механистического объяснения по сей день. Парадокс состоит в следующем: традиционно мишени летучих анестетиков искали в нервной ткани — ионных каналах, синаптических рецепторах, нейронных мембранах. У растений нет ни нейронов, ни синапсов. Тем не менее хлороформ обратимо подавляет потенциалы действия, габитуацию и суммацию стимулов в растительных тканях — с тем же дозозависимым профилем, что и в нервной ткани животных [Bose, 1926]. После удаления анестетика все реакции восстанавливаются.

Ключ к этому парадоксу лежит в истории самой анестезиологии. В 1899–1901 годах Мейер и Овертон независимо установили, что сила летучего анестетика пропорциональна его жирорастворимости (коэффициенту распределения масло/вода) — и это соотношение выполняется через шесть порядков величины для химически несхожих молекул [Meyer, 1899; Overton, 1901]. На протяжении почти столетия эта корреляция объяснялась «разжижением» липидного бислоя клеточных мембран. Однако ряд экспериментов опроверг липидную теорию: неиммобилайзеры — молекулы с высокой жирорастворимостью, но лишённые анестетической активности [Koblin et al., 1994] — показали, что растворимости в мембране недостаточно. Стереоизомеры анестетиков различаются по активности несмотря на идентичную жирорастворимость — что указывает на хиральную, то есть белковую мишень. Решающим доказательством стала демонстрация Фрэнксом и Либом того, что летучие анестетики ингибируют очищенную люциферазу в отсутствие каких-либо мембран [Franks & Lieb, 1982; 1994]: мишенью является белок.

Квантовые эффекты в тёплой, влажной биологической среде более не являются теоретической экзотикой: они экспериментально подтверждены в фотосинтетических антенных комплексах [Fleming et al., 2007] и в магнитоцепции птиц [Ritz et al., 2000]. Настоящая работа рассматривает иной механизм — квантовые суперпозиции в гидрофобных карманах тубулина — с собственной независимой доказательной базой.

Хаммерофф предложил конкретный класс белковых мишеней: гидрофобные карманы внутри тубулина — основного структурного белка микротрубочек [Hameroff, 1998]. По теории оркестрованной объективной редукции (Orch OR), разработанной совместно с Пенроузом [Penrose & Hameroff, 1996; Hameroff & Penrose, 2014], именно в этих карманах реализуются квантовые суперпозиции конформационных состояний тубулина. Их коллапс в результате объективной редукции (OR) лежит в основе сознательного опыта. Летучие анестетики, связываясь с карманами через ван-дер-ваальсовы взаимодействия, подавляют квантовые суперпозиции и тем самым «выключают» сознание. Эта модель переинтерпретирует корреляцию Мейера–Овертона: она отражает не растворимость в мембранах, а аффинность к гидрофобным карманам белков, прежде всего тубулина. Прямым подтверждением служит работа Крэддока с соавторами [Craddock et al., 2017], показавшая, что летучие анестетики изменяют коллективные ТГц-колебания тубулина пропорционально их клинической мощности, и работа Пала с соавторами [Pal et al., 2024], в которой стабилизатор микротрубочек эпотилон В задерживал потерю сознания у крыс.

Микротрубочки не являются специфически нейронной структурой. Они присутствуют во всех эукариотических клетках и построены из того же α/β -тубулина. Растительный тубулин гомологичен животному приблизительно на 75% на уровне аминокислотной последовательности; геометрия гидрофобных карманов эволюционно консервативна, что подтверждается одинаковым действием колхицина, таксола и нокодазола на микротрубочки как растений, так и животных.

Из этого следует вопрос, которому посвящена настоящая статья: если летучие анестетики подавляют раздражимость растений через тот же молекулярный механизм — связывание с гидрофобными карманами тубулина, — что подавляется в растительных клетках? Если мишень та же, что у животных, логично предположить, что и подавляемый процесс тот же: квантовые вычисления в микротрубочках по механизму Orch OR.

Настоящая работа формулирует эту гипотезу — гипотезу Боше–Пенроуза — в строгой форме, прослеживает её доказательную цепочку от наблюдений Боше через корреляцию Мейера–Овертона к структурной биологии тубулина, и предлагает

конкретные проверяемые предсказания. Если гипотеза верна, нейроны представляют собой не уникальный субстрат сознания, а его эволюционную специализацию: централизованную и многократно усиленную форму механизма, присущего всем эукариотическим клеткам.

2. Исторический контекст: работы Боше

Джагадиш Чандра Боше (1858–1937) — индийский физик и биофизик, один из пионеров исследования электрических сигналов в живых тканях. Работая в Калькутте в конце XIX — начале XX века, он последовательно демонстрировал, что реакции растений на внешние раздражители поддаются точному количественному измерению и обнаруживают черты, традиционно приписываемые исключительно нервной ткани животных. Для этого Боше сконструировал крескограф — прибор с механическим усилением до 10 000 крат, позволявший регистрировать микроскопические движения тканей, — а также электрический зонд для записи распространяющихся потенциалов [Bose, 1902; 1913].

В ходе систематических экспериментов Боше описал пять феноменов, каждый из которых в отдельности допускал объяснение с позиций классической физиологии, но в совокупности складывался в картину, выходящую за её рамки.

Потенциал действия. При механическом, термическом или химическом раздражении по тканям растения распространяется волна электрического потенциала. По форме кривой — нарастание, пик, реполяризация — она воспроизводит потенциал действия животной нервной ткани [Bose, 1913]. Скорость распространения у разных видов варьирует, однако принцип «всё или ничего» выполняется: пороговый стимул не вызывает распространяющегося сигнала. Современная электрофизиология полностью подтвердила существование распространяющихся потенциалов у растений [Fromm & Lautner, 2007]; в 2021 году биоманнитные сигналы *Venus flytrap* были зарегистрированы атомным магнетометром — прибор зафиксировал магнитный аналог нейронного потенциала действия [Fabricant et al., 2021].

Габитуация. При повторных слабых раздражениях амплитуда ответа постепенно снижается и может упасть до нуля; после периода покоя чувствительность восстанавливается [Bose, 1926]. Этот феномен — простейшая форма обучения — считался прерогативой нервной системы. Гальяно с соавторами воспроизвели его у *Mimosa pudica* в строго контролируемом современном эксперименте: растения обучались игнорировать повторные безвредные падения и сохраняли выработанный ответ спустя 28 дней [Gagliano et al., 2014]. В том же цикле работ была

продемонстрирована способность растений к ассоциативному обучению [Gagliano et al., 2016] — феномен, прежде связывавшийся исключительно с нервной системой.

Суммация. Два подпороговых стимула, разделённых коротким интервалом, способны вызвать надпороговый ответ [Bose, 1913] — явление, аналогичное временной суммации в синапсах. Современные исследования Ca^{2+} -сигнализации показали, что растение обладает системой быстрых кальциевых волн, способных интегрировать множественные сигналы в пространстве и времени [Toyota et al., 2018] — биохимический субстрат, объясняющий наблюдавшуюся Боше суммацию без привлечения синаптических структур.

Усталость. После серии сильных раздражений растение перестаёт отвечать на стимул и восстанавливает реактивность лишь спустя период отдыха [Bose, 1926]. Боше интерпретировал это как истощение физиологического ресурса, аналогичное рефрактерному периоду нервного волокна. Однако эта интерпретация неполна. В нейроне усталость имеет известный молекулярный адрес: истощение запасов нейромедиатора, накопление Ca^{2+} внутри клетки, сдвиг ионных градиентов. У растения специализированного аппарата для «накопления усталости» нет — и тем не менее усталость есть. Значит, нечто меняет своё состояние под воздействием повторных стимулов и удерживает это изменение на протяжении периода восстановления. Молекулярный субстрат этого состояния не установлен. Существенно, что усталость у Боше — не пассивное истощение ресурса: это регуляторный феномен. Система не «ломается» от перегрузки, она входит в защищённое состояние пониженной возбудимости и затем активно возвращается к исходной норме. Иными словами, у неё есть уставка нормальной возбудимости и механизм возврата к ней — что выводит усталость за рамки простой физиологии и делает её психоподобным откликом в точном смысле: не просто реакцией, а саморегуляцией.

Обратимое подавление анестетиками. Это центральное наблюдение для настоящей работы. Боше показал, что хлороформ и другие летучие анестетики полностью и обратимо подавляют все перечисленные реакции [Bose, 1926]. После вымывания анестетика растение восстанавливает реактивность — иногда проходя через кратковременную фазу повышенной возбудимости, сходную с наблюдаемой у животных. Боше сопоставил эти данные с действием тех же веществ на нервную ткань и констатировал качественное совпадение. Спустя почти столетие это наблюдение было воспроизведено независимой группой: Йокава с соавторами показали, что диэтиловый эфир блокирует потенциалы действия Venus flytrap и подавляет движения разнообразных органов растений; после аэрации все реакции восстанавливались в течение 15 минут [Yokawa et al., 2018]. Позднее тот же коллектив опубликовал систематический обзор, распространив этот вывод на всю

сенсорную и адаптивную систему растений [Yokawa & Baluška, 2021]. Таким образом, ключевое наблюдение Боше подтверждено в рецензируемых журналах Oxford University Press и Springer независимыми методами спустя 92 года после его первоначальной публикации.

Пять описанных феноменов объединяет общая структурная сигнатура. Реакции растений на раздражители — адаптивны (ответ меняется в зависимости от истории воздействий), интегративны (несколько входных сигналов объединяются в единый выходной) и полностью обратимы (система восстанавливает исходное состояние после прекращения воздействия). Именно эта архитектура — а не конкретный биохимический субстрат — роднит реакции растений с реакциями нервной ткани животных. Для обозначения данного класса реакций мы предлагаем термин **психоподобные отклики** (*psycho-like responses*): адаптивные, интегративные и обратимые реакции на внешние воздействия, структурно гомологичные психофизиологическим процессам. Термин нейтрален относительно вопроса о сознании: он описывает *архитектуру* отклика, а не его внутреннюю природу, и применим независимо от того, сопровождается ли данный процесс субъективным переживанием.

При более пристальном рассмотрении пять психоподобных откликов распределяются по непрерывному спектру временных масштабов хранения информации. Суммация действует на масштабе долей секунды: след первого стимула должен сохраняться до прихода второго — ультракратковременная интеграция, аналог рабочей памяти. Промежуточный масштаб — секунды — задокументирован у Venus flytrap: ловушка захлопывается только при двух касаниях разных чувствительных волосков в течение ~30 секунд [Hedrich & Neher, 2018]; след первого касания должен присутствовать в ткани к моменту второго — это кратковременная память состояния. Усталость разворачивается на масштабе минут и часов: система удерживает состояние перегрузки до завершения восстановления. Габитуация действует на масштабе недель: растение помнит безопасность конкретного стимула спустя 28 дней без единого повторения [Gagliano et al., 2014] — долговременная память по любому функциональному критерию. Таким образом, пять феноменов Боше образуют **иерархию четырёх уровней памяти**: от долей секунды до месяца. Субстрат каждого уровня не установлен.

С позиций теории информационных систем эта иерархия приобретает неожиданную чёткость. Суммация — регистры процессора: существует лишь в момент вычисления. Venus flytrap — кэш L2/L3: десятки секунд, volatile. Усталость — оперативная память: удерживает состояние рабочего сеанса, сбрасывается при «перезагрузке». Габитуация — постоянная память: переживает 28 «циклов сна». Аналогия немедленно обнажает главный вопрос: **как функционирует этот**

биологический компьютер? Что является носителем информации, где хранится программа и каков механизм её работы? В компьютере каждый уровень имеет известный субстрат — кремний, заряды, магнитные домены. В растении субстрат каждого уровня не установлен. Вероятно, это паттерны состояний, распределённые по тубулиновой сети — подобно тому, как файл закодирован в распределённом паттерне физических состояний носителя, а не «лежит» в одном месте.

Правило двух касаний Venus flytrap ставит отдельный системный вопрос о **пространственной суммации**. Два сигнала приходят от физически разделённых волосков — места интеграции нет. Чтобы порог был достигнут коллективно, каждая клетка ткани должна удерживать след первого касания до прихода второго. В терминах распределённых систем: это консенсус без master-узла, quorum detection без координатора. Примечательно, что правило двух касаний является ещё и фильтром: капля дождя (хаотичный одиночный стимул) ловушку не захлопнет. Система не просто суммирует — она классифицирует сигнал по паттерну. Это когнитивная функция, реализованная в ткани без единого нейрона.

Одним из кандидатов на роль субстрата памяти могут служить спиновые состояния самого тубулина. Тубулин — хиральный белок, и его спиральная структура должна проявлять CISS-эффект (Chiral Induced Spin Selectivity) — избирательное пропускание электронов по спиновой ориентации, подтверждённое для ДНК и белков [Naaman & Waldeck, 2012]. Триптофановые остатки гидрофобного кармана — те самые, с которыми связывается анестетик, — формируют ароматические радикальные пары со спин-зависимой рекомбинацией. Комбинаторное пространство спиновых состояний тубулиновой сети астрономически велико — достаточно для кодирования любого объёма биологической информации без дополнительных молекулярных структур. Это открытая гипотеза, не имеющая прямой экспериментальной проверки на растительном тубулине; она рассматривается подробнее в отдельной публикации.

Когнитивная архитектура растений — иерархия четырёх уровней памяти, пространственная интеграция без центрального узла и вопрос о субстрате информации — выходит за рамки настоящей работы и составляет предмет отдельной теоретической публикации [Александров, в подготовке: «Иерархия когнитивных функций у растений»].

Значимость экспериментальной программы Боше не ограничивается растительным царством. В монографии 1902 года «Response in the Living and Non-Living» Боше задокументировал аналогичные явления в неорганической материи: металлы — олово, железо, никель — при повторной электрической стимуляции обнаруживали усталость (снижение амплитуды ответа), восстановление после периода покоя и —

наиболее поразительно — подавление хлороформом, тем же агентом, который подавлял реакции растений [Bose, 1902]. Боше сформулировал явный вывод: граница между живым и неживым градуальна, а не онтологична; психоподобные отклики как архитектурный паттерн не принадлежат исключительно живой материи. Этот вывод, радикальный в 1902 году, приобретает новое измерение в контексте настоящей гипотезы: если субстратом раздражимости растений являются квантовые процессы в тубулине, то аналогичные отклики металлов указывают либо на иной субстрат той же архитектуры, либо на более широкое распределение квантовых процессов в материи — вопрос, остающийся открытым.

Совокупность этих данных ставит один вопрос с нарастающей остротой: какой общий молекулярный субстрат обеспечивает феноменологию, наблюдаемую Боше и подтверждённую современной наукой? Ответ на него и составляет предмет настоящей работы.

3. Теория Orch OR и роль анестетиков

Микротрубочка — полый цилиндр диаметром ~25 нм, стенки которого образованы спирально упакованными димерами α/β -тубулина. Каждый димер состоит из двух субъединиц (~55 кДа каждая), связанных нековалентно. Внутри каждой субъединицы находятся гидрофобные карманы — полости, выстланные неполярными аминокислотными остатками (лейцин, изолейцин, фенилаланин, триптофан) и изолированные от водного окружения. Низкий диэлектрик внутри кармана и минимальный тепловой шум от воды создают условия, принципиально отличающиеся от цитоплазматической среды [Hameroff, 1998].

Теория оркестрованной объективной редукции (Orch OR), разработанная Пенроузом и Хаммерофом [Penrose & Hameroff, 1996; Hameroff & Penrose, 2014], предполагает, что конформационные состояния тубулинового димера — две возможные пространственные конфигурации β -субъединицы — могут существовать в квантовой суперпозиции. Каждый димер таким образом функционирует как кубит, а вся микротрубочка, содержащая тысячи димеров в суперпозиции, реализует массивно параллельное квантовое вычисление.

Коллапс суперпозиции в теории Orch OR происходит не в результате декогеренции от теплового окружения (как в стандартной квантовой механике открытых систем), а вследствие объективной редукции (OR) — физического процесса, обусловленного нестабильностью суперпозиции квантово-гравитационных различий в пространстве-времени. Критерий OR задаётся соотношением Дирака–Пенроуза: суперпозиция коллапсирует, когда её гравитационная самоэнергия E достигает

порога $E \cdot \tau \approx \hbar$, где τ — время жизни суперпозиции, \hbar — приведённая постоянная Планка [Penrose, 1994]. Именно в этом отличие Orch OR от чисто вычислительных моделей сознания: коллапс не случаен (как в стандартном квантовом измерении) и не алгоритмичен — он определяется геометрией пространства-времени, что и обеспечивает, по Пенроузу, невычислимый характер сознательного опыта.

Роль летучих анестетиков в этой схеме специфична и хорошо определена. Анестетики — вещества с высокой аффинностью к гидрофобным средам — проникают в карманы тубулина и связываются там через ван-дер-ваальсовы взаимодействия. Эти взаимодействия достаточно слабы, чтобы не изменять первичную структуру белка, но достаточно сильны, чтобы нарушить тонкую квантовую динамику внутри кармана: электронные конфигурации ароматических остатков (прежде всего триптофана), обеспечивающие квантовую когерентность, подавляются присутствием чужеродной молекулы [Hameroff, 1998]. Результат — невозможность устойчивой суперпозиции, OR не достигает порога, квантовое вычисление прерывается. По Orch OR, это и есть потеря сознания.

Квантовые эффекты в изолированных π -системах — не умозрительное допущение: они прямо измерены в структурно родственных молекулах. Фуллерен C_{60} и углеродные нанотрубки — системы с замкнутой или протяжённой π -электронной оболочкой и полным отсутствием полярных групп — демонстрируют квантовую интерференцию в условиях, при которых большинство органических молекул декогерируют мгновенно [Arndt et al., 1999]. Причина та же, что обеспечивает устойчивость суперпозиции в гидрофобном кармане тубулина: изоляция π -электронной системы от флуктуирующего дипольного окружения воды. Гидрофобный карман тубулина воспроизводит этот принцип биологическими средствами: неполярная полость с ароматическими остатками (Trp, Phe, Tyr) структурно аналогична фуллереновой клетке, а сама микротрубочка — полый цилиндр диаметром ~ 25 нм — геометрически сопоставима с многостенной нанотрубкой. Это не случайное сходство: похоже, оба класса структур независимо реализуют оптимальную геометрию для удержания квантовой когерентности в условиях теплового шума.

Эта модель получила прямое экспериментальное подтверждение. Крэдок с соавторами [Craddock et al., 2017] показали, что летучие анестетики изменяют коллективные ТГц-колебания тубулина, причём сила эффекта линейно коррелирует с клинической мощностью анестетика — воспроизводя корреляцию Мейера–Овертона, но уже на уровне белка, а не мембраны. Пал с соавторами [Pal et al., 2024] продемонстрировали, что введение эпотилона В — стабилизатора микротрубочек — задерживает потерю сознания у крыс под действием изофлурана: чем устойчивее микротрубочки, тем труднее анестетику прервать квантовое

вычисление.

Особого внимания заслуживает резонансная иерархия, описанная Бандьопадхьяем с соавторами на основе широкополосных диэлектрических измерений микротрубочек [Sahu et al., 2013a; 2013b]. Авторы обнаружили масштабно-инвариантный ряд резонансных частот, охватывающий несколько порядков: ТГц (тубулиновый димер) → ГГц (олигомер) → МГц–кГц (микротрубочка) → Гц (пучок микротрубочек). Эта иерархия соответствует модели Orch OR, в которой квантовые суперпозиции отдельных димеров «оркестрируются» через когерентные колебания всей структуры. Показательно, что анестетики подавляют колебания именно в этом диапазоне — что согласуется с данными Крэдока и механизмом Хаммерофа.

Совокупность изложенного формирует связную молекулярную цепочку: гидрофобный карман тубулина → квантовая суперпозиция конформационных состояний → OR-коллапс → сознательный опыт; летучий анестетик → подавление суперпозиции в кармане → отсутствие OR → потеря сознания. В следующем разделе мы рассмотрим, в какой мере этот механизм переносим на растительные клетки.

Здесь необходимо сделать одну существенную оговорку. Термин «оркестрованная» указывает на нерешённую проблему самой теории: какой механизм согласует квантовые суперпозиции в тысячах тубулиновых димеров в биологически осмысленный результат? С позиций теории управления, любой контур координации предполагает целевое состояние (setpoint) — эталон, с которым сравнивается текущее состояние системы. Без setpoint координация невозможна: система не знает, к чему стремиться. Примечательно, что та же проблема возникает в отношении кинезина — моторного белка, шагающего по микротрубочкам с замечательной процессивностью и доставляющего груз к конкретным адресам. Броуновский храповик объясняет механику шага, но не адресацию: ни воспроизвести кинезин искусственно с сопоставимыми характеристиками, ни объяснить источник целевой информации пока не удалось. Принципиально, что уставка не может быть и статичной: **«Живая уставка»** (*living setpoint*) — уставка, способная к автономному пересмотру собственных критериев без обращения к внешнему агенту и без заранее заданного правила пересмотра — является необходимым условием жизнеспособности любой оркестрированной системы. Контур управления, содержащий такую уставку, мы называем **живой обратной связью** (*living feedback*): петлёй, в которой эталонное состояние не зафиксировано извне и не вычислено изнутри, а непрерывно порождается системой из источника, находящегося за пределами её вычислительного уровня. Это условие не выполняется ни в какой вычислительной архитектуре, включая квантовые компьютеры, которые остаются машинами Тьюринга по классу решаемых задач. Более того, поскольку живая уставка сама нуждается в уставке, возникает иерархия уровней управления

(«уставка уставок»), которая является прямой формальной аналогией «оркестрации» в смысле Пенроуза. Требование наличия внешней уставки не произвольно — оно вытекает из теоремы Гёделя о неполноте формальных систем: ни одна достаточно богатая формальная система не может доказать собственную непротиворечивость средствами того же уровня описания. Применительно к биологии: ни один механизм не способен полностью задать смысл своих операций из собственного субстрата — setpoint должен приходить извне. В ИТ-терминах это эквивалент невозможности написать программу, которая верифицирует саму себя без обращения к внешнему верификатору; регресс всегда упирается в живого агента, стоящего за пределами системы. Детальное обоснование этих понятий — их формальная необходимость из теорем Гёделя и тезиса Полани о надличностном характере знания — составляет предмет отдельной публикации, к которой настоящая работа отсылает читателя [Александров, в печати: «Оркестрация биологических процессов: необходимость обратной связи и проблема надквантовой уставки»]. Заметим, что этот вопрос не закрывается и обращением к Платоническому миру Пенроуза: статичный мир математических структур сам нуждается в источнике активности — в том, что не является ещё одной структурой, а представляет собой чистую порождающую активность, из которой истекают все структуры. Является ли живая уставка имманентной Платоническому миру или указывает на уровень, превосходящий его, — открытый теоретический вопрос, выходящий за рамки настоящей работы.

4. Микротрубочки у растений

Микротрубочки не являются специализированной структурой нервной ткани. Они присутствуют во всех эукариотических клетках — от дрожжей до нейронов — и выполняют универсальные функции: организацию клеточного деления, поддержание формы, внутриклеточный транспорт. Этот факт принципиален для настоящей гипотезы: если Orch OR реализуется в микротрубочках нейронов, то вопрос о его присутствии в клетках растений сводится к вопросу о сохранности субстрата.

Гомология тубулина. Растительный α/β -тубулин идентичен животному приблизительно на 75% на уровне аминокислотной последовательности [Hussey & Hawkins, 2001]. Это высокое сходство для двух ветвей эукариот, разошедшихся около 1,5 млрд лет назад. Периферийные участки молекулы, отвечающие за взаимодействие с регуляторными белками, различаются — что отражает специфику растительной клетки. Однако внутренние структурные домены, включая гидрофобные карманы, эволюционно консервативны.

Сохранность гидрофобных карманов — ключевой факт. Именно гидрофобные карманы тубулина являются, по Хаммерофу, местом квантовой суперпозиции и

мишенью летучих анестетиков. Их сохранность у растений подтверждается функционально: колхицин, таксол и нокодазол — вещества, связывающиеся с гидрофобными сайтами тубулина, — разрушают или стабилизируют микротрубочки как растений, так и животных с сопоставимой эффективностью [Morejohn, 1991]. Молекула, связывающаяся с карманом, не различает вид организма — геометрия кармана одинакова. Это и есть прямое молекулярное доказательство консервативности структуры, критичной для гипотезы.

Функции микротрубочек у растений. В растительной клетке микротрубочки выполняют по меньшей мере три функционально значимые роли. Во-первых, они образуют митотическое веретено при делении клетки — структурно и функционально идентичное животному. Во-вторых, кортикальные микротрубочки определяют направление укладки целлюлозных микрофибрилл клеточной стенки, задавая форму клетки и направление её роста [Lloyd & Chan, 2004]. В-третьих, микротрубочки участвуют в передаче сигналов: в клетках, реагирующих на механические и химические стимулы, перестройка кортикального МТ-массива происходит в течение секунд после раздражения.

Venus flytrap как модельная система. *Dionaea muscipula* — наиболее изученный пример быстрой интегративной реакции у растений. Захлопывание ловушки запускается двукратным касанием триггерных волосков в течение ~30 секунд; одиночное касание реакции не вызывает — растение «считает» стимулы. Этот эффект временной суммации реализуется без нейронов. Микротрубочки участвуют в передаче механического сигнала от триггерных волосков к двигательным клеткам [Hedrich & Neher, 2018], а биомагнитные сигналы, сопровождающие потенциал действия ловушки, были зарегистрированы атомным магнетометром [Fabricant et al., 2021] — что делает Venus flytrap уникальной экспериментальной моделью для проверки квантовых эффектов в МТ растений.

Плазмодесмы как межклеточный квантовый канал. В отличие от нейронов, клетки растений соединены плазмодесмами — цитоплазматическими каналами диаметром ~30–60 нм, пронизывающими клеточные стенки и обеспечивающими прямую связь между цитоплазмой соседних клеток. Через плазмодесмы распространяются ионные токи, малые молекулы и сигнальные белки. В контексте Orch OR плазмодесмы представляют собой потенциальный субстрат для распространения квантово-коррелированных состояний между клетками — функциональный аналог синаптической связи, реализованный принципиально иными структурными средствами. Это позволяет предложить иерархию резонансов для растительной клетки по аналогии с иерархией Бандьопадхья для нейронов:

тубулин (ТГц) → димер (ГГц) → МТ клетки (МГц-кГц) → симпласт через плазмодесмы (Гц)

Таким образом, растительная клетка располагает всеми структурными компонентами, необходимыми для реализации механизма Orch OR: α/β -тубулином с консервативными гидрофобными карманами, функционально активными микротрубочками, участвующими в сигнализации, и межклеточными каналами, способными служить субстратом для распространения коррелированных квантовых состояний. Следующий вопрос — работает ли этот механизм?

Поведение без нейронов: более широкий контекст. Растения — не единственные эукариоты, демонстрирующие координированное поведение в отсутствие нервной системы. Реснички *Paramecium* и жгутики сперматозоидов — аксономы из девяти пар микротрубочек — производят координированные волнообразные движения без какого-либо центрального управления. Амёбы осуществляют направленный хемотаксис через псевдоподии, организованные цитоскелетом. Наиболее впечатляющий пример — *Physarum polycephalum*, одноклеточный слизевик: он решает лабиринты, воспроизводит топологию транспортных сетей и демонстрирует антиципацию периодических стимулов — всё это без единого нейрона. Общий знаменатель во всех случаях — микротрубочки. Это наблюдение существенно для гипотезы: если МТ-субстрат поведения универсален у эукариот, случай растений перестаёт быть исключением и становится частью общей закономерности. Подробный анализ этих систем в контексте проблемы оркестрации представлен в отдельной работе.

5. Центральная гипотеза: Orch OR у растений

Структура аргумента

Четыре предшествующих раздела создают доказательную базу, из которой гипотеза следует с логической необходимостью. Сформулируем её структуру явно.

Посылка 1. Летучие анестетики обратимо подавляют раздражимость растений с дозозависимым профилем, идентичным действию на нервную ткань животных. Этот факт установлен Боше (1926) и независимо подтверждён в рецензируемых журналах спустя 92 года [Yokawa et al., 2018; Yokawa & Baluška, 2021].

Посылка 2. Молекулярный механизм действия летучих анестетиков — специфическое связывание с гидрофобными карманами тубулина. Именно в этих карманах, по теории Orch OR, реализуются квантовые суперпозиции

конформационных состояний. Специфичность к белковому карману — не предположение, а экспериментально установленный факт: неиммобилайзеры лишены анестетической активности при высокой жирорастворимости; стереоизомеры различаются по мощности; очищенная люцифераза ингибируется в отсутствие мембран [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Прямые измерения показали, что летучие анестетики изменяют ТГц-колебания тубулина пропорционально клинической мощности [Craddock et al., 2017], а стабилизатор микротрубочек эпотилон В задерживает потерю сознания у крыс [Pal et al., 2024].

Посылка 3. Гидрофобные карманы тубулина эволюционно консервативны и структурно идентичны у растений и животных. Прямое функциональное доказательство: колхицин, таксол и нокодазол — лиганды этих карманов — с равной эффективностью разрушают или стабилизируют микротрубочки обоих видов [Morejohn, 1991]. Молекула не различает вид организма; геометрия кармана — одна.

Вывод. Если летучие анестетики подавляют раздражимость растений через связывание с теми же карманами растительного тубулина, они подавляют тот же класс процессов, что и в нейронах. Поскольку в нейронах этот класс процессов является, по Orch OR, квантовыми суперпозициями конформационных состояний тубулина — логически необходимо заключить, что те же суперпозиции реализуются в микротрубочках растительных клеток и служат субстратом наблюдаемой Боше раздражимости.

Формальная формулировка

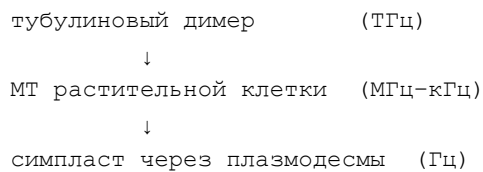
Гипотеза Боше–Пенроуза. Квантовые суперпозиции конформационных состояний тубулина, реализуемые в гидрофобных карманах $\alpha\beta$ -тубулиновых димеров, представляют собой общий молекулярный субстрат раздражимости для всех эукариотических клеток. Летучие анестетики подавляют раздражимость растений по тому же механизму, что и сознание животных: через связывание с консервативными гидрофобными карманами тубулина и нарушение квантовой динамики внутри них. Нейрон является не уникальным субстратом квантовых вычислений, а его эволюционной специализацией.

Иерархия резонансов в растительной клетке

Бандьопадхьяй с соавторами описали для нейронных микротрубочек масштабно-инвариантную иерархию резонансных частот, охватывающую несколько порядков величины: ТГц-колебания тубулинового димера → ГГц-колебания олигомера → МГц–кГц-колебания микротрубочки → Гц-колебания пучка [Sahu et al., 2013a; 2013b]. Эта иерархия соответствует модели Orch OR, в которой квантовые суперпозиции отдельных димеров оркестрируются через когерентные колебания

всей структуры.

В растительной клетке эта иерархия имеет функциональный аналог с одним принципиальным структурным добавлением. Плазмодесмы — цитоплазматические каналы диаметром ~30–60 нм, пронизывающие клеточные стенки, — создают континуум цитоплазмы между клетками (симпласт). Через симпласт распространяются ионные токи, Ca^{2+} -волны и сигнальные молекулы, обеспечивая электрическую и биохимическую связность на уровне ткани. В контексте Orch OR плазмодесмы представляют собой потенциальный субстрат для распространения квантово-коррелированных состояний между клетками — функциональный аналог синаптической связи, реализованный принципиально иными структурными средствами. Это позволяет описать иерархию резонансов для растительной клетки:



Примечательно, что диаметр плазмодесмы (~30–60 нм) сопоставим с диаметром самой микротрубочки (~25 нм): структура канала теоретически допускает механический контакт между цитоскелетными элементами соседних клеток, что открывает возможность прямой передачи механических колебаний через клеточную стенку.

Нейрон как эволюционная специализация

Принятие гипотезы меняет концептуальный статус нейрона. В стандартной нейробиологии нейрон рассматривается как клетка, специально предназначенная для обработки информации и формирования сознания, — уникальная структура, отделяющая «мыслящие» системы от «немыслящих». Гипотеза Боше–Пенроуза предполагает иное: нейрон является *эволюционной специализацией* механизма квантовых вычислений в микротрубочках, присущего всем эукариотам.

В этой перспективе эволюция нервной системы описывается как серия архитектурных решений поверх общего вычислительного субстрата. *Базовый уровень* — квантовые суперпозиции в МТ, координируемые через Ca^{2+} -волны и межклеточные контакты, — реализован у всех эукариот: одноклеточных (*Paramecium* — координированное движение ресничек через МТ-аксономы без центрального управления; *Physarum polycephalum* — решение лабиринтов и антиципация стимулов без единого нейрона), растений, грибов. *Первая специализация* — клетки с высокой плотностью МТ и быстрой сигнализацией, прото-нейроны (диффузная нервная сеть *Hydra*). *Централизация* — нейрон с аксоном: направленная передача сигнала на

большие расстояния; синапс — усиливаемая и модулируемая межклеточная связь вместо симпласта (*C. elegans*: 302 нейрона, полностью картированный коннектом). *Интеграция* — нейронные сети и мозг: масштабированная, многократно усиленная архитектура на том же молекулярном субстрате.

Аналогия из теории вычислительных систем: транзистор — базовый вычислительный элемент, предшествующий процессору. Процессор не изобретает новый принцип — он централизует, масштабирует и архитектурно оптимизирует то, что транзистор делал в отдельности. Наличие CPU не делает отдельный транзистор «ненастоящим» вычислительным элементом. Наличие мозга не делает растительную клетку системой без квантовых вычислений.

Связь с биоэлектрическим морфогенезом

Майкл Левин показал, что биоэлектрические паттерны — градиенты трансмембранного потенциала, поддерживаемые через щелевые контакты (gap junctions), — направляют морфогенез, регенерацию и онкогенез независимо от генетической программы [Levin, 2021]. Биоэлектрический паттерн функционирует как вышестоящий уровень управления — уставка для нижележащих молекулярных процессов.

Щелевые контакты животных и плазмодесмы растений функционально сходны: оба создают электрически связанные клеточные ансамбли [Levin, 2021; Fromm & Lautner, 2007]. По аналогии с биоэлектрическими паттернами, описанными Левиным для gap junctions, можно предположить, что симпласт растений способен выполнять аналогичную координирующую роль — однако это остаётся гипотезой, не имеющей прямой экспериментальной проверки. Гипотеза Боше–Пенроуза и программа Левина описывают тогда разные уровни одной архитектуры: Orch OR — квантовый вычислительный уровень; биоэлектрический паттерн — вышестоящий классический управляющий уровень. Вопрос о том, как эти уровни взаимодействуют и сколько уровней иерархии существует в действительности, остаётся открытым и составляет одну из центральных проблем квантовой биологии.

6. Проверяемые предсказания

Научная ценность теоретической гипотезы определяется не только логической строгостью, но и её способностью породить конкретные, фальсифицируемые предсказания. Ниже сформулированы шесть предсказаний, каждое из которых прямо вытекает из гипотезы Боше–Пенроуза и допускает проверку экспериментальными методами, существующими в современной биофизике и молекулярной биологии.

Каждое предсказание сопровождается описанием ожидаемого результата при истинности гипотезы и результата, который гипотезу фальсифицирует.

Предсказание 1. Аффинность летучих анестетиков к тубулину растений предсказывает их потенцию в подавлении раздражимости.

Гипотеза утверждает, что анестетики подавляют раздражимость растений именно через связывание с гидрофобными карманами растительного тубулина. Если это так, сила подавления должна коррелировать с аффинностью молекулы к этому сайту — а не с её жирорастворимостью как таковой. Этим данное предсказание отличается от тривиальной Meyer–Overton-корреляции: оно требует корреляции с белковым сайтом, а не с мембранной растворимостью.

Протокол: выделить тубулин из растительных клеток (стандартный источник — листья шпината или *Arabidopsis thaliana*); измерить константы связывания серии летучих анестетиков методом изотермической титрационной калориметрии (ITC) или поверхностного плазмонного резонанса (SPR). Параллельно на *Mimosa pudica* и Venus flytrap определить EC_{50} тех же анестетиков для подавления раздражимости *in vivo*. Сопоставить ряды аффинности и потенции. Использование тубулина из разных видов растений методологически обосновано высокой консервативностью последовательности (~75% гомологии между видами растений); идеальным контролем была бы параллельная серия с тубулином, выделенным непосредственно из *Mimosa pudica*, однако это требует значительно большего количества биомассы.

Подтверждение гипотезы: ранжирование анестетиков по аффинности к растительному тубулину совпадает с ранжированием по потенции подавления раздражимости. *Фальсификация:* корреляция выше с жирорастворимостью, чем с тубулиновой аффинностью — это указывало бы на мембранный, а не тубулиновый механизм.

Предсказание 2. Мутанты *Arabidopsis thaliana* с изменёнными гидрофобными карманами тубулина демонстрируют изменённую чувствительность к анестетикам.

Это наиболее прямой тест механизма. *Arabidopsis* кодирует несколько изоформ α - и β -тубулина (TUA1–6, TUB1–9); прицельная замена аминокислотных остатков, формирующих гидрофобный карман, методами CRISPR/Cas9 позволяет создать растения с геометрически изменённым сайтом связывания анестетика.

Протокол: ввести точечные мутации в остатки β -тубулина, соответствующие предполагаемому сайту связывания анестетика по Хаммерофу (прежде всего гидрофобные остатки в районе β -субъединицы). Сравнить три параметра у

мутантных и диких линий: (1) пороговую концентрацию анестетика, подавляющую потенциал действия; (2) базовую раздражимость в отсутствие анестетика; (3) скорость восстановления после анестезии.

Подтверждение гипотезы: мутанты с уменьшенным карманом требуют более высоких концентраций анестетика (пониженная чувствительность); мутанты с расширенным карманом — более низких (повышенная). Базовая раздражимость при этом изменяется синхронно — поскольку тот же карман является субстратом квантовых суперпозиций. *Фальсификация:* мутация меняет чувствительность к анестетику, но не влияет на базовую раздражимость — это указывало бы на то, что карман является только сайтом связывания, но не функциональным субстратом раздражимости.

Предсказание 3. Микротрубочки растительных клеток при 300 К обнаруживают иерархию диэлектрических резонансов, инвариантную по масштабу, аналогичную нейронным.

Бандьопадхьяй с соавторами [Sahu et al., 2013a; 2013b] описали для нейронных МТ иерархию резонансных частот, охватывающую несколько порядков: ТГц → ГГц → МГц–кГц → Гц. Если растительный тубулин реализует те же квантовые суперпозиции — та же иерархия должна присутствовать в растительных МТ.

Протокол: выделить МТ из клеток *Arabidopsis* или шпината; применить широкополосную диэлектрическую спектроскопию (метод Бандьопадхьяй) или ТГц-спектроскопию. Сравнить спектры с нейронными МТ и с контролями после деполимеризации колхицином. Дополнительно: повторить измерение в присутствии летучих анестетиков — предсказание состоит в том, что анестетики будут подавлять те же частотные диапазоны, что и у нейронных МТ (репликация Craddock et al., 2017, но с растительным тубулином).

Подтверждение гипотезы: спектр растительных МТ воспроизводит масштабно-инвариантную иерархию; анестетики подавляют её пропорционально клинической мощности. *Фальсификация:* иерархии нет, или она качественно отличается от нейронной — это указывало бы на различие квантовой динамики несмотря на структурное сходство тубулина.

Предсказание 4. Субстрат габитуации у *Mimosa pudica* связан с состоянием микротрубочек.

Гальяно с соавторами задокументировали, что *Mimosa pudica* обучается игнорировать повторные безвредные падения и удерживает этот ответ в течение 28 дней [Gagliano et al., 2014]. Молекулярный субстрат этой «памяти» не установлен. Из

гипотезы Боше–Пенроуза следует строгое предсказание относительно **формирования** габитуации: поскольку анестетики подавляют МТ-динамику в реальном времени, они должны нарушать запись нового следа памяти непосредственно в ходе обучения. Это прямое следствие гипотезы, фальсифицируемое независимо. Вопрос об **удержании** уже сформированной памяти строгим предсказанием не является — субстрат долговременного следа может не совпадать с субстратом ОР-коллапса, и его природа представляет собой самостоятельную научную проблему. Результаты эксперимента по удержанию памяти, однако, образуют развилку для дальнейших исследований: МТ-зависимость удержания указывала бы на единый субстрат записи и хранения; её отсутствие — на разделение механизмов и необходимость поиска субстрата долговременной памяти за пределами МТ-динамики.

Протокол: разделить растения на группы: (а) обучение при нормальных условиях; (б) обучение на фоне субанестетических концентраций нокодазола или колхицина (деполимеризация МТ); (в) обучение на фоне таксола (стабилизация МТ). Разграничить два этапа: агент действует **во время** обучения (тест строгого предсказания) и агент вводится **после** обучения (разведочный вопрос об удержании). Тестировать: скорость выработки габитуации; удержание через 28 дней; восстановление раздражимости после прекращения обработки.

Подтверждение гипотезы: МТ-агенты, действующие во время обучения, нарушают формирование габитуации. *Фальсификация:* МТ-агенты не влияют на формирование габитуации даже при действии во время обучения — что указывало бы на МТ-независимый механизм записи и ставило бы под сомнение МТ-природу субстрата раздражимости у *Mimosa*.

Предсказание 5. Терпеноидные стабилизаторы микротрубочек усиливают, а не подавляют раздражимость растений.

Гипотеза предсказывает структурную симметрию: если анестетики подавляют квантовую динамику в карманах тубулина и тем самым снижают раздражимость, то молекулы с той же аффинностью к карману, но стабилизирующие МТ, должны давать противоположный эффект. Таксол (дитерпен из *Taxus brevifolia*) стабилизирует МТ у животных и задерживает потерю сознания под анестетиком [Pal et al., 2024] — это доказательство принципа у животных. Летучие монотерпены (β -кариофиллен, 1,8-цинеол, α -пинен), входящие в состав эфирных масел, биохимически родственны таксолу и с высокой аффинностью взаимодействуют с гидрофобными средами.

Протокол: измерить базовую раздражимость *Mimosa pudica* и *Venus flytrap* (порог и скорость реакции на стандартный механический стимул); экспонировать растения в течение 15–30 минут парам летучих монотерпенов (β -кариофиллен, 1,8-цинеол) в субанестетических концентрациях; повторить измерение. Параллельно: экспозиция диэтиловым эфиром как отрицательный контроль. Дополнительно: проверить, создаёт ли терпеновая обработка устойчивость к последующему анестетическому подавлению.

Подтверждение гипотезы: терпены снижают порог раздражимости и/или ускоряют ответ; предварительная обработка терпенами повышает концентрацию анестетика, необходимую для подавления. *Фальсификация:* терпены не отличаются по эффекту от анестетиков — что означало бы, что аффиность к гидрофобной среде предсказывает только подавление, но не усиление.

Предсказание 6. Летучие анестетики изменяют двулучепреломление микротрубочек в клетках растений.

Упорядоченные массивы тубулина оптически анизотропны: их двулучепреломление (birefringence) измеримо методами поляризационной микроскопии и служит прямым показателем структурной упорядоченности МТ-сети [Inoué, 1953; Oldenbourg & Mei, 1995]. В наблюдаемом birefringence-сигнале присутствуют два независимых вклада: (1) *форменное* двулучепреломление — следствие периодической геометрии самой трубки, доминирующий вклад; (2) *собственное* двулучепреломление — молекулярная анизотропия поляризуемости тубулиновых димеров, определяемая прежде всего ориентацией ароматических остатков (Phe, Trp, Tyr) в гидрофобном кармане. Гипотеза Боше–Пенроуза допускает два механизма изменения суммарного сигнала при действии анестетика.

Прямой путь: анестетик занимает гидрофобный карман → переориентирует ароматические остатки → меняет тензор поляризуемости димера → незначительно изменяет собственное двулучепреломление. Это тонкий эффект: форменный вклад доминирует, и данный путь может оказаться ниже порога обнаружения стандартными методами.

Косвенный путь: анестетик меняет конформационное равновесие GTP-/GDP-тубулина → изменяет кинетику полимеризации и деполимеризации МТ → плотность и ориентационный порядок МТ-сети в клетке меняется → форменное двулучепреломление меняется как интегральный сигнал. Этот путь вероятно более чувствителен к обнаружению; косвенным подтверждением служит показанное Craddock et al. изменение коллективных ТГц-осцилляций тубулина под действием анестетиков, что отражает изменение в динамике белка [Craddock et al., 2017].

Протокол: поляризационная микроскопия живых клеток растений (меристема корня *Allium cepa* или *Arabidopsis*) с мониторингом birefringence МТ-пучков до и после экспозиции летучим анестетиком (диэтиловый эфир, изофлуран). Контроль деполимеризации: колхицин устраняет сигнал полностью, подтверждая его МТ-специфичность. Контроль обратимости: отмыв анестетика. Серия концентраций: от субнаркотических до наркотических.

Подтверждение гипотезы: анестетики изменяют birefringence МТ-сетей дозозависимо, с корреляцией по клинической потенции; сигнал восстанавливается после отмыва. *Фальсификация:* birefringence не изменяется на фоне поведенческой анестезии — это указывало бы на то, что анестетики действуют через механизм, не затрагивающий структурную упорядоченность МТ (например, через мембранные каналы или актиновый цитоскелет).

Усиление через дневную МТ-реорганизацию. Кортикальные МТ-массивы в клетках растений физически меняют ориентацию в течение суток: транспозиция от поперечной к продольной ориентации и обратно управляется световыми сигналами и сопряжена с суточным ростовым циклом [Lloyd & Chan, 2004]. Это смещение ориентации непосредственно отражается в birefringence-сигнале клетки и образует измеримый, воспроизводимый суточный паттерн. Анестетик, нарушающий МТ-динамику, должен сбивать этот паттерн — а не просто незначительно менять абсолютное значение Δn в единственной временной точке. Сравнение «нормальный суточный цикл birefringence vs. цикл на фоне анестетика» экспериментально значительно убедительнее снимка «до и после»: контроль встроен в саму природу явления. Важная оговорка: описанная МТ-реорганизация — *дневная* (diurnal), то есть управляемая светом; её строго циркадная природа (сохранение в постоянных условиях) требует отдельной проверки.

Практическое значение: поляризационная микроскопия не требует флуоресцентных меток и позволяет наблюдать МТ-динамику в нативных условиях. Предсказание 6 уступает предсказанию 3 по физической прямолинейности (форменный вклад маскирует молекулярный), но существенно выигрывает по экспериментальной доступности: поляризационный микроскоп — стандартное оборудование любой биологической лаборатории.

Совокупность шести предсказаний охватывает четыре уровня анализа: молекулярный (предсказания 1–2), биофизический (предсказания 3, 6), поведенческий (предсказания 4–5). Предсказание 6 принципиально отличается от остальных: это прямое оптическое зондирование конформационного состояния тубулина без маркировки. Гипотеза Боше–Пенроуза фальсифицируема на каждом из уровней независимо.

7. Обсуждение

7.1 Ограничения

Гипотеза опирается на незавершённую теорию. Orch OR — конкурирующая гипотеза с растущей экспериментальной базой, но без научного консенсуса. Декогеренция в тёплой влажной клеточной среде остаётся серьёзным физическим возражением: оппоненты [Tegmark, 2000] оценивают время жизни квантовых суперпозиций в нейронах на уровне 10^{-13} секунды — на многие порядки меньше, чем требует OR-порог Пенроуза. Сторонники Orch OR возражают, что гидрофобный карман изолирован от теплового шума воды и представляет собой принципиально иную среду, нежели открытая цитоплазма; прямые измерения [Babcock et al., 2024] подтвердили квантовые коллективные состояния в МТ при комнатной температуре. Тем не менее дискуссия не закрыта, и настоящая гипотеза наследует эту неопределённость.

Прямых данных о квантовых эффектах в МТ растений не существует. Измерения Бандьопадхья проводились на нейронных МТ; эксперименты Крэддока — с тубулином животных. Ни одна работа не измеряла ТГц-спектр растительного тубулина в присутствии анестетиков. Предсказание 3 настоящей работы прямо адресует этот пробел, однако до его экспериментальной проверки данное звено доказательной цепочки остаётся умозрительным.

Классическая ионная химия предоставляет конкурирующие объяснения. Все пять феноменов Боше — потенциал действия, габитуация, суммация, усталость, подавление анестетиками — допускают объяснение через Ca^{2+} -сигнализацию, ионные каналы и рецепторную десенситизацию без привлечения квантовых допущений. Летучие анестетики ингибируют у растений не только тубулин, но и ионные каналы плазматической мембраны. Настоящая работа не утверждает, что классические механизмы неверны — она утверждает, что квантовые процессы в тубулине образуют дополнительный уровень организации, объясняющий специфику Meyer–Overton-корреляции на молекулярном уровне.

«Память» Mimosa допускает альтернативные объяснения. Габитуация у *Mimosa pudica* может быть обусловлена изменением тургорного давления в двигательных клетках, обратимой модификацией Ca^{2+} -каналов или рецепторной адаптацией — без привлечения субстрата МТ. Предсказание 4 разработано именно для того, чтобы разграничить эти возможности экспериментально.

Оркестрация OR без нейронов остаётся открытым вопросом. Orch OR в нейронах предполагает «оркестровку» квантовых суперпозиций нейрональными процессами — Ca^{2+} -волнами, синаптическими паттернами, сетевыми осцилляциями.

В растительной клетке эти механизмы отсутствуют. Настоящая гипотеза предполагает, что аналогичную роль выполняют Ca^{2+} -волны в симпласте и механическая связность через плазмодесмы (раздел 5), — однако прямых экспериментальных данных, подтверждающих межклеточную координацию OR-событий у растений, не существует. Это наиболее уязвимое звено логической цепочки: механизм подавления анестетиком обоснован, механизм оркестрации — нет. Предсказания 3 и 6 косвенно тестируют этот вопрос через измерение когерентных осцилляций растительного тубулина, но прямой проверки он требует в отдельном исследовании.

7.2 Ответы на возражения

Draguhn et al. [2020] утверждают, что анестетическое действие на растения отражает общую клеточную токсичность, а не специфический механизм, связанный с сознанием. Однако эта позиция воспроизводит липидно-мембранную теорию анестезии, опровергнутую ещё в 1980–1990-х годах: неиммобилайзеры с высокой жирорастворимостью лишены анестетической активности, стереоизомеры различаются по мощности несмотря на идентичную жирорастворимость, а очищенная люцифераза ингибируется летучими анестетиками в полном отсутствие мембран [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Специфичность к гидрофобным карманам белков, прежде всего тубулина, — это не предположение, а экспериментально подтверждённый факт [Craddock et al., 2017; Pal et al., 2024]. Примечательно, что эти данные были получены уже после публикации Draguhn et al. и прямо отвечают на их возражение.

Здесь уместно указать на методологическое преимущество, которое, как ни парадоксально, делает растения более подходящей модельной системой, чем нейроны. В нейронной ткани летучие анестетики действуют на множество молекулярных мишеней одновременно: ГАМК-А-рецепторы, NMDA-рецепторы, опиоидные рецепторы, потенциалзависимые натриевые каналы — все они вносят вклад в суммарный анестетический эффект и затрудняют вычленение конкретного вклада тубулина. В растительной клетке эти мишени отсутствуют полностью: нет нейронных рецепторов, нет синаптических структур, нет опиоидной системы. Тубулин оказывается единственным кандидатом, удовлетворяющим критерию Meyer–Overton — корреляции, воспроизводящейся через семь порядков величины для химически несхожих молекул. Глутамат-подобные рецепторы растений (GLR) и механочувствительные каналы (MSL) также ингибируются рядом анестетиков [Fromm & Lautner, 2007; Toyota et al., 2018], однако их ингибирование не следует Meyer–Overton-закономерности и не объясняет специфику стереоизомеров и неиммобилайзеров. Белковый гидрофобный карман тубулина — единственная идентифицированная структура, геометрия которой воспроизводит

физико-химическую основу этой корреляции. Это значит, что наблюдение Боше — полное и обратимое подавление раздражимости летучими анестетиками — в растениях свидетельствует о мишени с большей однозначностью, чем аналогичные данные по нейронам. Отсутствие нервной системы, традиционно воспринимавшееся как слабость аргумента, является его экспериментальной силой: растения представляют собой более чистую модель для проверки тубулинового механизма анестезии, чем нейроны.

Более широкое возражение состоит в следующем: даже если анестетики действуют через тубулин, это ещё не доказывает, что подавляемый ими процесс в растениях имеет отношение к сознанию. Гипотеза Боше–Пенроуза принимает это возражение как честное и отвечает на него структурой: настоящая работа не утверждает, что растения сознательны в человеческом смысле. Она утверждает, что молекулярный субстрат, лежащий в основе раздражимости растений, идентичен субстрату, предложенному теорией Orch OR для сознания животных. Вопрос о том, что именно в растениях соответствует этому субстрату функционально, — открыт и составляет предмет предсказаний раздела 6.

7.3 Архитектурный аргумент: психоподобные отклики требуют большего, чем механизм

Сказанное указывает на более глубокое ограничение механистических объяснений. Ионные каналы, Ca^{2+} -волны и рецепторная десенситизация описывают молекулярные механизмы отдельных реакций — но не объясняют их совокупную архитектуру. Психоподобный отклик адаптивен: система меняет ответ в зависимости от истории воздействий, то есть поддерживает динамическую уставку — референсное состояние, с которым сравнивается текущий вход. Он интегративен: несколько сигналов объединяются согласно некоему критерию, то есть уставка взвешивает входы относительно цели. Он обратим: система возвращается в исходное состояние — то есть уставка восстанавливается после нарушения.

Как указано в разделе 3 применительно к проблеме оркестрации, любой контур координации с адаптивной уставкой требует *живой уставки* — способной к автономному пересмотру собственных критериев без обращения к внешнему агенту. Это условие не выполняется ни в одной вычислительной архитектуре: любая машина Тьюринга, включая квантовые компьютеры, оперирует в рамках предзаданных правил и не способна пересмотреть их изнутри. Живая уставка предполагает источник, находящийся вне вычислительного уровня системы.

Именно это предоставляет Orch OR: OR-коллапс определяется не алгоритмом, а геометрией пространства-времени — структурой Платонического мира в терминах

Пенроуза. Это и есть не-вычислимый источник руководящего принципа, логически требуемый архитектурой психоподобного отклика. Таким образом, сам факт существования психоподобных откликов — ещё до вопроса об анестетиках и тубулине — указывает на уровень организации, превосходящий механистическое описание. Это не прямое доказательство прото-сознания, но архитектурное требование, которому прото-сознание отвечает, тогда как замкнутый механизм в изоляции — нет. Классическая ионная химия описывает, как реализуется отклик; вопрос о том, почему он организован именно так — адаптивно, интегративно и обратимо, — остаётся за её пределами.

Машинное обучение предоставляет третье, операциональное доказательство той же необходимости — и наиболее доступное современному читателю. Базовый алгоритм обучения нейронной сети ($\theta \rightarrow \theta - \eta \cdot \nabla L(\theta)$) математически невозможен без внешне заданной функции потерь L : без цели нет градиента, нет обучения. Иерархия уставок в любой ML-системе — параметры, гиперпараметры, архитектура, выбор задачи — никогда не закрывается внутри системы; на вершине всегда находится живой агент. Это операциональная реализация того, что Гёдель доказал формально, а Полани — эпистемологически: система не может задать смысл своих операций из собственного описательного уровня. Существенно, что обратная связь в любой схеме обучения — предобучение на текстах, RLHF, конституциональный AI — замыкается через человеческое сознание или его кристаллизованные продукты (книги, научные статьи, оценки экспертов). Ни одна схема не закрывает петлю без сознания снаружи. Именно это делает разрыв между ML и сознанием не вопросом масштаба или сложности, а онтологическим: OR-коллапс предлагает единственный математически когерентный способ закрыть этот регресс — через геометрию Платонического мира, самодостаточную по определению.

7.4 Импликации

Нейрон — не за пределами, а внутри континуума. Если гипотеза верна, нейрон является не изобретением природы, а её архитектурным решением поверх уже существующего механизма. Это изменяет постановку центрального вопроса нейронауки: не «как нейроны порождают сознание», а «как нейронная архитектура усиливает и централизует процесс, универсальный для всех эукариот». В этой перспективе заслуживает внимания пример, находящийся прямо внутри животного организма. Интринсическая нервная система сердца содержит около 40 000 нейронов, образующих собственные ганглиозные сети и способных к независимой обработке информации [Armour, 2007]. Показательна анатомическая асимметрия, которая редко упоминается даже в специальной литературе: число нервных волокон, идущих от сердца к мозгу, значительно превышает число волокон, идущих в обратном направлении — около 80% волокон блуждающего нерва являются

афферентными [Berthoud & Neuhuber, 2000]. Сердце не получает команды сверху — оно непрерывно посылает их вверх. В рамках теории Пенроуза–Хаммерофа нейроны сердечных ганглиев с теми же микротрубочками и гидрофобными карманами тубулина являются полноправными кандидатами на участие в квантовых вычислениях; вопрос о том, что именно передаётся по этим 80% восходящих волокон, приобретает в этом контексте неожиданное измерение.

Примечательно, что интринсическая нервная система сердца обнаруживает чувствительность к геомагнитной обстановке: варибельность сердечного ритма коррелирует с уровнем геомагнитной активности — этот эффект задокументирован как в проспективных когортных исследованиях [Kim et al., 2022; PMID 35644403], так и в физиологических экспериментах с непрерывным мониторингом HRV [McCraty et al., 2017]. Если этот эффект реализуется через механизм радикальных пар — спин-зависимых квантовых состояний, задокументированных в магнитоцепции птиц [Ritz et al., 2000], — то сердечные нейроны оказываются площадкой, на которой OR-коллапс в тубулине модулируется глобальными космическими процессами.

Граница сознания в природе. Стандартная нейробиология проводит онтологическую границу: нейроны есть — сознание возможно; нейронов нет — сознание исключено. Гипотеза Боше–Пенроуза предполагает иное: эта граница количественна, а не качественна. Сознание — или то, что Пенроуз называет прото-сознанием, — не изобретено животными и тем более не является преимуществом человека. Оно присутствует там, где OR-коллапс в тубулине достигает порога, — то есть во всех эукариотических клетках. Нейронные системы не ввели принципиально новый процесс; они создали его масштабированную, централизованную и семантически обогащённую архитектуру.

Примечательно, что сам Боше указывал ещё дальше. В «Response in the Living and Non-Living» (1902) он зафиксировал психоподобные отклики в неорганической материи — металлах, демонстрирующих усталость, восстановление и подавление хлороформом. Если граница живое/неживое градуальна, как настаивал Боше, то вопрос о месте прото-сознания в этом континууме остаётся открытым за пределами биологии. Настоящая работа не претендует на его решение; она лишь указывает, что доказательная логика, разработанная здесь для растений, воспроизводит интуицию, которую Боше обнаружил и в неживом веществе сто двадцать лет назад.

Молекулярная сложность как предиктор. Принимая гипотезу, мы неизбежно встречаем вопрос: почему именно тубулин? Один из возможных ответов лежит в структурной аналогии с молекулярными системами, у которых квантовая устойчивость подтверждена экспериментально. Фуллерены и углеродные нанотрубки — «чистые» π -электронные системы — находятся в непрерывном

молекулярном ряду от простых ароматических колец до сложных белковых полостей. Тубулин, по всей видимости, занимает в этом ряду особое место: его гидрофобный карман, по-видимому, реализует ту же физическую идею изоляции, что и фуллереновая клетка, — но в биологическом контексте, который, если гипотеза Orch OR верна, допускает оркестровку квантовых состояний на уровне всей МТ-сети. Если это так, молекулярная сложность и π -электронная насыщенность могут служить косвенными предикторами квантовой «доступности» для OR — а поиск квантово-вычислительных субстратов в биологии стоит начинать именно с гидрофобных, ароматически насыщенных полостей.

Энергоэффективность как косвенное свидетельство. Человеческий мозг потребляет ~20 Вт при решении задач, для приближённого воспроизведения которых современным нейросетям требуются датацентры с мегаваттами потребления [Attwell & Laughlin, 2001]. Этот разрыв не объясняется только архитектурными преимуществами (отсутствие фон-неймановского узкого горла, разреженное кодирование). Если Orch OR верна, квантовая когеренция МТ обеспечивает «бесплатную» координацию через запутанность и потенциально работает ниже классического предела Ландауэра, поскольку OR-коллапс определяется планковской геометрией, а не термодинамикой. Парадоксальная энергоэффективность мозга может быть косвенной эмпирической сигнатурой квантового вычисления в микротрубочках.

Математическая структура OR-коллапса. Примечательно, что математическая структура, лежащая в основе Orch OR, воспроизводится независимо на нескольких уровнях описания. Конформационные состояния тубулинового димера — переходы между двумя пространственными конфигурациями β -субъединицы — суть вращения в конформационном пространстве, описываемые группой $SU(2)$. Та же группа описывает спин электрона в квантовой механике, CISS-эффект в хиральном тубулине [Naaman & Waldeck, 2012] и спиноры в OR-критерии Пенроуза [Penrose & Rindler, 1984]. Одна математическая структура обнаруживается на уровне электронного спина, молекулярного конформационного перехода и планковской геометрии пространства-времени. Единичные кватернионы, образующие группу $SU(2)$, не имеют аналога в евклидовом пространстве или пространстве Минковского — они Платоничны в строгом смысле: обнаружены Гамильтоном, а не изобретены. Если Orch OR верна, биологическое вычисление реализуется в алгебре, которая существует только в Платоническом мире. Это наблюдение носит предварительный характер и требует отдельного математического анализа; здесь оно приводится как указание на глубину структурного единства, которое гипотеза Боше–Пенроуза открывает за пределами биологии.

Практические следствия. Если тубулин является универсальным субстратом раздражимости у эукариот, анестезиология получает новую аналитическую рамку: эффективность летучих анестетиков определяется не их жирорастворимостью как таковой, а аффинностью к эволюционно консервативному гидрофобному карману конкретного белка. Это открывает возможность рационального дизайна анестетиков с заданной специфичностью к тубулиновым изоформам различных тканей. Для биологии растений следствие состоит в том, что чувствительность к анестетикам может служить косвенным маркером квантовой динамики в МТ и, следовательно, индикатором физиологического состояния растительной ткани — применение, выходящее за рамки фундаментальной науки.

8. Заключение

Боше задокументировал факт, который нейробиология на протяжении столетия предпочитала не замечать: летучие анестетики подавляют раздражимость растений с тем же дозозависимым профилем, что и сознание животных — обратимо, специфично, воспроизводимо. Настоящая работа предлагает механистическое объяснение этого факта, опирающееся на три независимых доказательных линии: механизм действия анестетиков (специфичность к гидрофобным карманам тубулина, а не к мембранным липидам — что устанавливает молекулярную мишень), эволюционная консервативность этой мишени (структура кармана тубулина сохранена у растений и животных, что доказывается одинаковым действием колхицина и таксола на оба таксона) и теория Orch OR (OR-коллапс в тубулиновых карманах как субстрат сознательного опыта). Из пересечения этих трёх линий следует гипотеза Боше–Пенроуза: квантовые суперпозиции конформационных состояний тубулина являются общим молекулярным субстратом раздражимости для всех эукариот, а нейрон — эволюционной специализацией этого универсального механизма, а не его уникальным носителем.

Значение гипотезы, если она подтвердится, выходит за рамки биологии растений. Граница сознания в природе — вопрос, который стандартная нейробиология решала анатомически (есть нейроны — есть сознание) — оказывается вопросом количественным, а не онтологическим. Прото-сознание, в терминологии Пенроуза, не изобретается биологической эволюцией: оно присутствует там, где OR-коллапс в тубулине достигает порога, — то есть во всех эукариотических клетках. Нейронные системы не ввели принципиально новый процесс: они создали для него масштабированную, централизованную и семантически обогащённую архитектуру. Архитектурный анализ психоподобных откликов — адаптивных, интегративных и обратимых реакций, обнаруживаемых у растений, одноклеточных и, по наблюдениям Боше, даже в неживой материи — указывает на то, что их организация требует

живой обратной связи: петли с уставкой, источник которой находится за пределами вычислительного уровня системы. Это структурное требование, независимое от экспериментальной проверки Orch OR, само по себе является аргументом против сведения раздражимости к чисто механистическому описанию. Оно получает операциональное подкрепление из трёх независимых источников: формально — теорема Гёделя (замкнутая формальная система не выводит собственное полное описание); эпистемологически — аргумент Полани о молчаливом знании; операционально — базовый алгоритм машинного обучения: любой градиентный спуск ($\theta \rightarrow \theta - \eta \cdot \nabla L(\theta)$) математически невозможен без внешне заданной функции потерь L , и ни одна реализованная система обучения не закрывает петлю обратной связи без сознания снаружи. Дополнительным косвенным свидетельством квантовой природы вычисления служит парадоксальная энергоэффективность мозга: ~20 Вт против мегаватт датацентров при сопоставимой вычислительной сложности задачи [Attwell & Laughlin, 2001]. Этот разрыв не объясняется только архитектурными преимуществами — если Orch OR верна, OR-коллапс определяется планковской геометрией, а не термодинамикой, и потенциально работает ниже классического предела Ландауэра.

Настоящая работа — теоретическая: она формулирует гипотезу, прослеживает её доказательную логику и предлагает конкретные экспериментальные тесты. Шесть предсказаний охватывают четыре уровня анализа — молекулярный, биофизический, поведенческий и оптический — и фальсифицируемы независимо друг от друга. Наиболее доступные немедленно: измерение аффинности анестетиков к тубулину растений методом изотермической калориметрии; воздействие летучих монотерпенов на раздражимость *Mimosa pudica* и *Venus flytrap*; поляризационная микроскопия клеток растений в присутствии анестетиков (стандартное оборудование, нативные условия, без меток). Наиболее определяющие: ТГц-спектроскопия растительных микротрубочек в присутствии анестетиков; мутанты *Arabidopsis* с изменёнными гидрофобными карманами тубулина. Ни один из этих экспериментов не был поставлен. Их результаты — в любую сторону — продвинули понимание молекулярных основ раздражимости у эукариот и прояснят, где в непрерывном спектре живой материи пролегает граница квантовых вычислений.

Боше писал в 1902 году, что граница между живым и неживым градуальна. Он не имел инструментов, чтобы указать молекулярный субстрат этого градиента. Спустя сто двадцать лет структурная биология тубулина, квантовая биофизика и теория Orch OR предоставляют именно такие инструменты. Гипотеза Боше–Пенроуза — попытка воспользоваться ими, чтобы проверить интуицию, которая оказалась точнее своего времени.

Новизна — краткая формулировка

Барлоу (2015) упоминает Orch OR у растений в общих чертах, но не использует данные Боше, не разбирает механизм анестетиков через тубулин и не формулирует проверяемых предсказаний. Настоящая работа оригинальна в следующем:

1. Данные Боше (1913–1926) как центральное доказательство, а не иллюстрация
 2. Корреляция Мейер–Овертон как связующее звено между Боше и Orch OR
 3. Конкретные молекулярные предсказания (аффинность анестетиков к тубулину растений, мутанты *Arabidopsis*)
-

Список литературы

Боше

- Bose, J.C. (1926). *The Nervous Mechanism of Plants*. Longmans, Green and Co.
- Bose, J.C. (1902). *Response in the Living and Non-Living*. Longmans.
- Bose, J.C. (1913). *Researches on Irritability of Plants*. Longmans.

Orch OR и анестетики

- Penrose, R. (1994). *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford University Press.
- Penrose, R., & Rindler, W. (1984). *Spinors and Space-Time, Volume 1: Two-Spinor Calculus and Relativistic Fields*. Cambridge University Press.
- Hameroff, S., & Penrose, R. (1996). Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules. *Mathematics and Computers in Simulation*, 40, 453–480.
- Hameroff, S., & Penrose, R. (2014). Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory. *Physics of Life Reviews*, 11(1), 39–78.
- Hameroff, S. (1998). Anesthesia, consciousness and hydrophobic pockets. *Toxicology Letters*, 100–101, 31–39.
- Tegmark, M. (2000). Importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, 61(4), 4194–4206.
- Draguhn, A., Mallatt, J.M., & Robinson, D.G. (2020). Anesthetics and plants: no pain, no brain, and therefore no consciousness. *Protoplasma*, 258(2), 239–248.
<https://doi.org/10.1007/s00709-020-01550-9>

Мейер–Овертон и механизм анестетиков

- Meyer, H. (1899). Zur Theorie der Alkoholnarkose. *Archiv für experimentelle Pathologie und Pharmakologie*, 42, 109–118.
- Overton, C.E. (1901). *Studien über die Narkose*. Verlag von Gustav Fischer.

- Franks, N.P., & Lieb, W.R. (1982). Molecular mechanisms of general anaesthesia. *Nature*, 300(5892), 487–493.
- Franks, N.P., & Lieb, W.R. (1994). Molecular and cellular mechanisms of general anaesthesia. *Nature*, 367(6464), 607–614.
- Koblin, D.D., Chortkoff, B.S., Laster, M.J., Eger, E.I., Halsey, M.J., & Ionescu, P. (1994). Polyhalogenated and perfluorinated compounds that disobey the Meyer-Overton hypothesis: implications for theories of narcosis. *Anesthesia & Analgesia*, 79(6), 1043–1048.

Микротрубочки и тубулин

- Sahu, S., Ghosh, S., Ghosh, B., Aswani, K., Hirata, K., Fujita, D., & Bandyopadhyay, A. (2013a). Atomic water channel controlling remarkable properties of a single brain microtubule: Correlating single protein to its supramolecular assembly. *Biosensors and Bioelectronics*, 47, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.02.050>
- Sahu, S., Ghosh, S., Hirata, K., Fujita, D., & Bandyopadhyay, A. (2013b). Multi-level memory-switching properties of a single brain microtubule. *Applied Physics Letters*, 102(12), 123701. <https://doi.org/10.1063/1.4793995>
- Nogales, E., Wolf, S.G., & Downing, K.H. (1998). Structure of the $\alpha\beta$ tubulin dimer. *Nature*, 391, 199–203.

Анестетики и растения — современные подтверждения

- Yokawa, K. et al. (2018). Anaesthetics stop diverse plant organ movements, affect endocytic vesicle recycling and ROS homeostasis, and block action potentials in Venus flytraps. *Annals of Botany*, 122(5), 747–756. PMC6215046
- Yokawa, K., & Baluška, F. (2021). Anaesthetics and plants: from sensory systems to cognition-based adaptive behaviour. *Protoplasma*, 258, 753–761. PMC7907011

Квантовые эффекты в биологии

- Arndt, M., Nairz, O., Vos-Andreae, J., Keller, C., van der Zouw, G., & Zeilinger, A. (1999). Wave–particle duality of C_{60} molecules. *Nature*, 401(6754), 680–682.
- Engel, G.S., Calhoun, T.R., Read, E.L., Ahn, T.K., Mančal, T., Cheng, Y.C., Blankenship, R.E., & Fleming, G.R. (2007). Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, 446(7137), 782–786.
- Ritz, T., Adem, S., & Schulten, K. (2000). A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical Journal*, 78(2), 707–718.
- Naaman, R., & Waldeck, D.H. (2012). Chiral-Induced Spin Selectivity Effect. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 3(16), 2178–2187.

Электрофизиология растений

- Fromm, J., & Lautner, S. (2007). Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 249–257.
- Fabricant, A. et al. (2021). Action potentials induce biomagnetic fields in carnivorous Venus flytrap plants. *Scientific Reports*, 11, 15662.
- Toyota, M. et al. (2018). Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science*, 361(6407), 1112–1115.

Поведение и память растений

- Gagliano, M. et al. (2014). Experience teaches plants to learn faster and forget slower in environments where it matters. *Oecologia*, 175, 63–72.
- Gagliano, M. et al. (2016). Learning by association in plants. *Scientific Reports*, 6, 38427.
- Hedrich, R., & Neher, E. (2018). Venus flytrap: how an excitable, carnivorous plant works. *Trends in Plant Science*, 23(3), 220–234.

Левин

- Levin, M. (2021). Bioelectric signaling: Reprogrammable circuits underlying embryogenesis, regeneration, and cancer. *Cell*, 184(8), 1971–1989.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.02.067>

Энергетика мозга

- Attwell, D., & Laughlin, S.B. (2001). An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 21(10), 1133–1145.

Интринсическая нервная система сердца

- Armour, J.A. (2007). The little brain on the heart. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 74(Suppl 1), S48–S51.
- Berthoud, H.R., & Neuhuber, W.L. (2000). Functional and chemical anatomy of the afferent vagal system. *Autonomic Neuroscience*, 85(1–3), 1–17.
- Kim, J.H. et al. (2022). Geomagnetic disturbances reduce heart rate variability in the Normative Aging Study. *Science of The Total Environment*. PMID 35644403.
- McCraty, R. et al. (2017). Synchronization of Human Autonomic Nervous System Rhythms with Geomagnetic Activity in Human Subjects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 770. PMC5551208.

Поляризационная микроскопия и двулучепреломление биологических полимеров

- Inoué, S. (1953). Polarization optical studies of the mitotic spindle. *Chromosoma*, 5(1), 487–500.

- Oldenbourg, R., & Mei, G. (1995). New polarized light microscope with precision universal compensator. *Journal of Microscopy*, 180(2), 140–147.

Микротрубочки у растений — структура и гомология

- Hussey, P.J., & Hawkins, T.J. (2001). Plant microtubule-associated proteins: the HEAT is on. *Trends in Plant Science*, 6(6), 239–241.
- Morejohn, L.C. (1991). The molecular pharmacology of plant tubulin and microtubules. *The Cytoskeletal Basis of Plant Growth and Form*, 29–43.
- Lloyd, C., & Chan, J. (2004). Microtubules and the shape of plants to come. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 5(1), 13–22.

Предшествующие работы по Orch OR у растений

- Barlow, P.W. (2015). The natural history of consciousness, and the question of whether plants are conscious, in relation to the Hameroff-Penrose quantum-physical 'Orch OR' theory of universal consciousness. *Communicative & Integrative Biology*. PMC4594572

Новые экспериментальные подтверждения Orch OR (важны для актуальности)

- Craddock et al. (2017). Anesthetic Alterations of Collective Terahertz Oscillations in Tubulin Correlate with Clinical Potency. *Scientific Reports*.
<https://www.nature.com/articles/s41598-017-09992-7>
 - Pal et al. (2024). Microtubule-Stabilizer Epothilone B Delays Anesthetic-Induced Unconsciousness in Rats. *eNeuro*.
<https://www.eneuro.org/content/11/8/eneuro.0291-24.2024>
 - Babcock, N.S., Montes-Cabrera, G., Oberhofer, K.E., Chergui, M., Celardo, G.L., & Kurian, P. (2024). Ultraviolet superradiance from mega-networks of tryptophan in biological architectures. *The Journal of Physical Chemistry B*, 128(17), 4035–4046.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c07936>
-