

УДК 167+159.9+530.1

DOI:

10.15372/PS20200106

Д.В. Винник**КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА
В ФИЗИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МОЗГА:
АМПЛИФИКАЦИЯ ИЛИ НИВЕЛИРОВКА?***

В статье представлены обзор и анализ теоретических и эмпирических аргументов в пользу гипотезы квантового мозга и против нее. К проponentам данной теории относятся сторонники идеи амплификации квантовых свойств до уровня макросостояний мозга (включая психологические состояния и поведение) и идеи эфпатической передачи – «полевой» несинаптической связи между аксонами. Оппоненты утверждают, что все квантовые события в нервной ткани статистически усредняются и нивелируются вплоть до того, что квантовые флуктуации вообще не имеют значения, и что термодинамические условия функционирования нервной ткани препятствуют проявлению макроскопических квантовых эффектов. Сегодня позиции скептиков сильнее, однако к настоящему моменту накопилось значительное количество эмпирических свидетельств, заслуживающих самого пристального внимания. Если сторонники идеи амплификации правы, то это должно иметь следствием неожиданный ответ на вопрос о природе человека и его месте в мире. С этой точки зрения все существа, обладающие нервной системой, предстают как полноценные агенты мира первозданного хаоса, они являются устройствами, способными усиливать случайные события квантово-механического мира до макромасштабов, реализуя их не только во внутренних состояниях своего мозга, но и вовне – в своем поведении.

Ключевые слова: квантовая биология; сознание; психика; квантовая теория сознания; квантовая механика; синергетика; критические состояния; амплификация; нейрофизиология; нейронная сеть; эфпатическая передача; несинаптическая связь

D.V. Vinnik**QUANTUM PROPERTIES IN THE PHYSICS OF THE BRAIN:
AMPLIFICATION OR LEVELING?**

The article reviews and analyzes theoretical and empirical arguments for the quantum brain hypothesis and against it. Supporters of the idea of amplification of quantum properties to macro-states of the brain (including psychological states and behavior) and the idea of ephaptic coupling, i.e. "field" non-synaptic connection of axons, are among proponents of the theory. Its opponents

* Исследования, нашедшие отражение в данной статье, выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-511-00025 Бел_а).
© Винник Д.В., 2020

insist that all quantum events in nerve tissue are being statistically averaged and leveled to the point where quantum fluctuations do not matter at all; thermodynamic conditions of the nerve tissue functioning impede the occurrence of macroscopic quantum effects. Now, sceptics' positions are stronger, but to date there is accumulated a substantial amount of empirical evidence, which is worth thorough considering. If supporters of amplification are true, it must result in an unexpected answer to the question of the human nature and man's place in the world. Seen in that light, all beings which have nervous system appear to be full agents of the primeval chaos world: they are means capable to reinforce random quantum-mechanical events to macro-scale realizing them not only in inner states of their brains, but also outside, i.e. in their behavior.

Keywords: quantum biology; consciousness; psyche; quantum theory of consciousness; quantum mechanics; synergetics; critical states; amplification; neurophysiology; neural network; ephaptic coupling; non-synaptic connection

В предыдущей статье «Квантовая теории сознания: метафизические спекуляции и конкретно-научное содержание» [1] был обозначен подход, согласно которому верификация квантовой теории сознания возможна при условии обнаружения в деятельности мозга макрофеноменов, природа которых будет признана квантовой – в том смысле, что без допущений квантовой механики их объяснение будет неполным. В идеале такими макрофеноменами должны стать поведенческие акты и когнитивные функции. К настоящему времени среди известных явлений подобного психологического порядка существуют немногочисленные кандидаты на эту роль – бистабильное восприятие, феномен противоположных ответов при смене последовательности вопросов (так называемый эффект последовательности) и немонотонность убеждений вообще, спонтанность воспоминаний, ассоциативность мышления. Аргументов в пользу квантовой природы этих явлений всего два: общепhilософский и математический. Сталкиваясь с перечисленными феноменами, мы имеем дело со значительной неопределенностью их конкретных реализаций, с дуализмом и даже мультимодальностью ментальных актов, более того, их структура порой выглядит парадоксально с точки зрения здравого смысла и даже с точки зрения формальной логики. В наличии этих свойств неопределенности, парадоксальности и мультимодальности психических актов философы усматривают аналогию с квантовыми объектами. Математическая аргументация заключается в том, что распределение вероятностей некоторых из этих явлений носит небайесовский характер, присущий распределению квантовых событий. Этих аргументов, очевидно, недостаточно для проверки квантовой теории сознания, которую корректнее называть квантовой теорией психики, поскольку речь идет о всем комплексе психических актов, а далеко не только о феномене самосознания.

Закономерен вопрос: какие эмпирические аргументы необходимы в принципе? Перечисленные аргументы апеллируют сугубо к «интерфейсу» психики, к тому, что мы имеем на выходе «черного ящика», которым является мозг. Для верификации квантовой теории психики нужно вскрыть механику мозга начиная от микроструктур, в которых квантовые эффекты имеют место по необходимости, и до известной макроорганизации мозга, ответственной за поведение. Более того, надо показать, как квантовые события глубоко внутри нервных клеток способны транслировать свои свойства сквозным образом через уровни движения материи: от квантово-механического к физико-химическому, далее к нервно-биологическому и наконец к поведенческо-психическому. Для этого необходима теория, которую правильнее именовать квантовой *теорией мозга*. Следует отметить, что такая теория уже создается в рамках междисциплинарного подхода, известного как квантовая биология, и обычно именуется *гипотезой квантового мозга*.

С одной стороны, основания для такой теории есть самые серьезные. В аксонах, дендритах, на синаптических щелях и мембранах нейронов нашего электрохимического компьютера с точки зрения теории вполне могут иметь место эффекты квантового туннелирования, приводящие к «беспроводной» передаче сигнала, а скорее, к ошибкам в его передаче. Также с точки зрения теории должны иметь место и эффекты квантового спутывания, когеренции, по крайней мере в нейронных механизмах фоторецепции. С другой стороны, известные физике квантовые макрофеномены: сверхтекучесть, сверхпроводимость, голография, квантование магнитного потока через сверхпроводник и суперпозиция токовых состояний (ток течет по кольцу сразу в обе стороны) – существуют в искусственных условиях сверхнизких температур. Утверждение, что мозг является генератором и усилителем квантовых эффектов до макроуровня, было бы на этом фоне очень смелым. Однако у этой точки зрения есть свои сторонники, и их относительно немало. Их эксперименты и теоретические аргументы будут рассмотрены ниже. Для начала изложим аргументы против, – они весомы, но их немного.

Существует всего два аргумента, которые обычно выдвигаются против так называемой гипотезы квантового мозга.

Во-первых, на масштабах нервной ткани, выполняющих вычислительные функции, все квантовые события статистически усредняются

и нивелируются вплоть до того, что квантовые флуктуации вообще не имеют значения. Причина этого состоит в том, что нейромедиаторы, нейроны и нейронные сети слишком велики по своим размерам, чтобы квантовые феномены играли существенную роль в их функционировании.

Наиболее весомо эта критика изложена в совместной статье американского нейробиолога К. Коха и немецкого физика К. Хеппа «Квантовая механика в мозге» [26]. Авторы обращают внимание на две известные биофизические операции, лежащие в основе обработки информации в мозге: химическую передачу данных через синаптическую щель и генерацию потенциалов действия. В обе операции вовлечены тысячи ионов и нейротрансмиттерных молекул, связанных диффузией или мембранным потенциалом, который простирается на десятки микрометров. *«Хотя мозг подчиняется квантовой механике, он, судя по всему, не использует никаких своих особенностей. Молекулярные машины, такие как светоусиливающие компоненты фоторецепторов, пре- и постсинаптические рецепторы и белки, управляемые напряжением и лигандом, охватывающие клеточные мембраны и поддерживающие возбудимость нейронов, настолько велики, что их можно рассматривать как классические объекты»* [28]. Согласно точке зрения Коха и Хеппа, оба процесса настолько масштабны, что неизбежно разрушают любые состояния квантовой когерентности. Нейрон в определенный момент времени либо возбужден, либо нет, а не находится в суперпозиции противоположных состояний. Таким образом, нейроны не способны оперировать квантовой информацией.

Далее Кох и Хепп напоминают, что значительная надежда на то, что мозг действительно использует квантово-механические феномены, связана с предположением о том, что в нервной системе реализованы квантовые алгоритмы, которые намного могущественнее традиционных алгоритмов, основанных на классической физике. «Наиболее известным из них является алгоритм Шора для факторизации больших целых чисел в криптографических целях. Однако за последнее десятилетие не было найдено ни одного квантового алгоритма, приближающегося по силе и степени применимости к алгоритму Шора. Но факторинг больших чисел – это вовсе не то, что необходимо мозгу для его работы. Почему эволюция должна была повернуть в сторону квантовых вычислений, настолько превратных и капризных, если классические нейросетевые вычисления, очевидно, вполне достаточны для решения проблем, с которыми сталкиваются нервные системы? ... Гораз-

до более вероятно, что материальная основа сознания может быть понята в сугубо нейробиологических рамках, без привлечения квантово-механической *deus ex machina*» [26].

Кох и Хепп полагают, что эмпирическая демонстрация «медленных декогерентных и управляемых квантовых битов» в нейронах или открытие эффективного квантового алгоритма, исполняемого мозгом, могли бы сделать многое для того, чтобы эти предположения стали из «весьма отдаленных» просто «очень маловероятными». Пока такой прогресс не достигнут, оснований обращаться к квантовой механике для объяснения высших функций мозга, включая сознание, очень мало.

Во-вторых, термодинамические условия функционирования нервной ткани препятствуют проявлению макроскопических квантовых эффектов, или, как выражается П. Джедлика, «нетривиальных» квантовых состояний, к которым он относит прежде всего когерентность [23]. Специфика среды состоит в том, что она слишком «теплая» и слишком «влажная». Как едко заметили упомянутые Кох и Хепп, нервная система представляет собой «300-градусную кельвиновскую ткань, сильно связанную с окружающей средой». Такие условия должны приводить к тому, что «декогеренция будет преобладать и квантовые вычисления нейронов не будут возможны» [26].

Известный физик и астробиолог П. Дэвис также настаивает на том, что если квантовая механика и играет нетривиальную роль в биосистемах, то должен иметь место способ поддержания квантовой когерентности если не для биологических, то по крайней мере для биохимических масштабов. «...Без этого критически важного шага квантовая биология мертва. Упрощенные расчеты скорости декогеренции в этом отношении очень обескураживающие: в такой теплой и мокрой среде, как клетка, периоды декогеренции выглядят чрезвычайно короткими» [14]. Действительно, все известные интересные когерентные квантовые состояния, которые необходимы для любого нетривиального квантового вычисления, существуют только в хорошо изолированных искусственных условиях и быстро разрушаются окружающей средой.

В 1999 г. шведско-американский астрофизик М. Тегмарк привел свои пессимистические численные оценки: «Основываясь на расчетах нейронной декогеренции, мы утверждаем, что степени свободы человеческого мозга, относящиеся к когнитивным процессам, следует рассматривать в качестве классической, а не квантовой системы. Это означает, что ничего фундаментально неверного в нынешнем классическом подходе к нейросетевому моделированию нет. Мы находим, что мас-

штабы декогеренции ($\sim 10^{-13}$ – 10^{-20} с) обычно намного меньше временного диапазона, необходимого как для возбуждения нейронов, так и для запуска изломоподобной (kink-like) поляризации в микротрубочках ($\sim 10^{-3}$ – 10^{-1} с). Этот вывод не согласуется с предположениями Пенроуза и других, считающих, что мозг действует как квантовый компьютер и что эта квантовая когерентность фундаментальным образом связана к сознанием» [36].

В самом деле, общепринятым является мнение, что в макроскопических объектах, включая наш мозг, квантовые флуктуации усредняются. Однако помимо гипотезы квантового мозга, которую следует считать сильной, имеет место и слабое предположение, согласно которому квантовые события могут влиять на деятельность мозга – увеличивать его вычислительную мощность и способность кодирования информации.

Это предположение основывается на аргументации, апеллирующей к сложной нелинейной динамике мозга с высокой чувствительностью к небольшим колебаниям, которые теоретически способны усиливать микроскопические квантовые эффекты. Именно такой точки зрения придерживается П. Джедлика: «...Нервная система представляет собой нелинейную динамическую сложную систему, проявляет высокую стохастическую активность... вопреки давней точке зрения, в некоторых условиях сильная связь с шумной и теплой средой способна скорее способствовать, чем препятствовать длительной квантовой когерентности в биологических системах. В итерационных иерархиях с нелинейной динамикой (на грани хаоса) небольшие (даже бесконечно малые) флуктуации не усредняются, но могут быть усилены. Квантовые флуктуации на самых низких уровнях могут влиять на начальное состояние на следующем уровне, в то время как более высокие уровни формируют граничные условия более низких уровней. Эта иерархия вложенных сетей с большим количеством петель обратной связи скорее использует, чем нейтрализует квантовые эффекты, как это предположил Джеффри Сатиновер» [23].

Действительно, популярный американский психиатр Дж. Сатиновер в книге 2002 г. «Квантовый мозг: В поисках свободы и человека будущего» утверждает, что квантовые эффекты могут ускорить вычислительные процессы на микроскопическом уровне и что нелинейная

хаотическая динамика может усиливать квантовые флуктуации, «модулируя крупную мезоскопическую и, возможно, также макроскопическую активность нейронов» [32, р. 6]. А израильский физик и нейробиолог Х. Сомполински в своем эссе о природе свободы воли высказал этот аргумент еще более просто и выразительно: «Хаос в мозге может чрезвычайно усилить небольшие квантовые флуктуации... до такой степени, что это повлияет на время возбуждения нейронов» [34, р. 14].

Любопытно, что упомянутый К. Кох, один из известных критиков теории квантового мозга, также изложил свои взгляды на проблему свободы воли с точки зрения физики и признал такой механизм возможным: «Нельзя исключать, что крошечные квантовые флуктуации в глубине мозга усиливаются детерминированным хаосом и в конечном итоге приводят к поведенческому выбору» [25, р. 34].

Тема квантово-индетерменистской природы свободы воли оказалась востребованной и благодатной. Настолько, что популярный за пределами академического сообщества специалист по квантовым вычислениям С. Ааронсон выдвинул собственную теорию «свободного бита» (freebit), согласно которой «хаотическая динамика мозга» может усилить до макроскопического масштаба эффект от произвольного бита, сгенерированный в результате квантовой флуктуации» [2].

В приведенных примерах мы имеем дело с весьма распространенной аргументацией, апеллирующей к теории неравновесных систем, или так называемой теории хаоса (синергетике). К сожалению, очень часто подобные аргументы не выходят за пределы типичных «синергетических» спекуляций про «крылья бабочки, вызывающей ураган» и не содержат эмпирических доказательств. Почему мы должны быть убеждены в том, что мозг представляет собой сложную нелинейную систему, «балансирующую на грани хаоса»? С одной стороны, перечисленные свойства кажутся очевидными: во-первых, мозг – предельно сложная из известных природных структур; во-вторых, он обладает свойством пластичности. Однако означает ли это, что он одновременно настолько сложен и настолько пластичен, что способен амплифицировать малейшие квантовые флуктуации через каскад уровней физической организации? Установить это можно только эмпирически.

Наиболее значимыми стали эксперименты, в которых был выявлен феномен, получивший название нейронных лавин. Этот феномен стал значительным опытным подспорьем для так называемой гипотезы критического мозга (critical brain hypothesis). В изложении аргентинского математика Д. Чиальво указанная гипотеза гласит, что крупные

биологические нейронные сети, к которым, бесспорно, относятся мозги, работают вблизи фазовых переходов. Это означает, что активность мозга будет непрерывно колебаться между двумя фазами: уменьшением и усилением. В рамках данной гипотезы предполагается, что в состоянии критичности вычислительные мощности мозга значительно возрастают [13]. В изложении С. Ааронсона эта гипотеза звучит еще более доходчиво: «Мозг кажется балансирующим на острие ножа между порядком и хаосом: будь он ритмичен, как маятник, он не мог бы поддерживать интересное поведение; будь он хаотичным, как погода, он не мог бы поддержать рациональность» [2].

В этой идее нет ничего нового, начало размышлениям о критической природе нейродинамики было положено не кем иным, как А. Тьюрингом в его знаменитой статье «Вычислительные машины и интеллект» [37] в 1950 г. Видный математик прибегает к аналогии состояний ядерного реактора, сравнивая мозг с ядерной сборкой. Как известно, ядерная сборка может находиться в подкритическом, критическом и сверхкритическом состояниях. Состояния степени критичности определяются количеством делений, которые способен вызвать один нейтрон, а сама критичность зависит от размера и плотности сборки. «Имеет ли место соответствующий феномен для умов, существует ли он для машин?» [37, р. 454], – ставит вопрос Тьюринг. В конечном счете он задает смелый, но вполне закономерный вопрос: возможно ли создать сверхкритическую вычислительную машину? На вопрос о человеческом разуме он отвечает скорее положительно, поскольку большинство разумов, или мозгов, представляются подкритическими. Нейтрон, попадающий в сборку, он сравнивает с идеей, попадающей в мозг: «идея, представленная подобному разуму, должна в среднем порождать менее одной идеи в ответ» [Ibid.]. Лишь совсем немного умов можно характеризовать как сверхкритические, поскольку идея, представленная таким умам, может порождать целостные «теории», состоящие из вторичных, третичных и еще более отдаленных идей, полагал Тьюринг.

В 1995 г. А. Херц и Дж. Хопфилд доказали, что так называемые модели самоорганизованной критичности (self-organized criticality, SOC) для землетрясений математически эквивалентны моделям интегрированных и возбужденных нейронов (integrate-and-fire neurons) [21]. Одновременно Д. Стассинопулос и П. Бак предложили простую модель нейронной сети, для которой критичность является нормальным состоянием [35].

В 2003 г. гипотеза нашла экспериментальную поддержку со стороны Дж. Беггса и Д. Пленца, представивших свидетельства того, что нейронные сети могут создавать сложные модели коллективной активности, которые и были названы нейронными лавинами [8]. Именно Дж. Беггс стал наиболее влиятельным исследователем феномена нейронных лавин, одновременно сохраняя скепсис насчет гипотезы критического мозга. «Нейронная лавина – это каскад всплесков активности в нейронных сетях... Активность в срезах неокортекса характеризуется короткими всплесками продолжительностью в десятки миллисекунд, разделенных периодами покоя, продолжающимися несколько секунд. При наблюдении с многоэлектродной решеткой число электродов, приводимых в действие сверх порога во время вспышки, распределяется примерно экспоненциально. Хотя это явление очень устойчиво и воспроизводимо, его связь с физиологическими процессами в неповрежденном мозге в настоящее время неизвестна» [7].

Суть экспериментов Беггса и Пленца состояла в том, что они с помощью 60-канальной инвазивной многоэлектродной матрицы исследовали паттерны нейроактивности в корковых нейронах крыс путем непрерывной регистрации спонтанных потенциалов локальных полей. Исследователи утверждают, что спонтанная активность проявляла заметную синхронность в относительно длительных временных масштабах и это «убедительные причины того, что нейронные лавины должны рассматриваться как новый способ сетевой активности», который сильно отличается от колебательных, синхронизированных или волнообразных состояний сети. В критическом состоянии сеть может удовлетворять противоположным требованиям эффективности передачи информации и сетевой стабильности [8].

Аналогичные результаты, подтверждающие критичность в головном мозге, представили в 2012 г. Г. Деко и В. Джирса на больших масштабах с использованием магнито-резонансной томографии [15]. В 2009 г. Дж. Хан и его коллеги исследовали потенциалы локального поля и спайки в зрительной коре кошек под наркозом и пришли к выводу, что спонтанная активность зрительной коры обладает свойствами нейронных лавин даже в этом состоянии [20].

Безотносительно к эмпирической концепции нейронных лавин М. Лондон и М. Хауссер исследовали вычислительные возможности дендритов. Они осторожно утверждают, что даже возбуждение отдельного нейрона имеет некоторый шанс вызвать возмущение значительных масштабов. «Преобладающим было мнение, что обработка ин-

формации в нейронных сетях обусловлена главным образом свойствами синапсов и связности нейронов внутри сети; при этом считалось, что собственная возбудимость отдельных нейронов играет меньшую роль. Как следствие, вклад отдельных нейронов в вычисления долгое время недооценивался» [28].

Если названные явления действительно существуют, то какое место они занимают в общей динамике нейроактивности? Как обобщает П. Джедлика, мы можем наблюдать три типа динамики в мозге: 1) упорядоченную/докритическую динамику, состоящую из колебательной синхронной активности с характерными признаками высокой координации и низкой изменчивости; 2) случайную/сверхкритическую динамику, состоящую из асинхронной нерегулярной активности с низкой координацией и высокой изменчивостью; 3) комплексную/критическую динамику с высокой координацией и высокой изменчивостью. Именно последний тип динамики, утверждает Джедлика, является наиболее интересным, поскольку в этом состоянии мозг демонстрирует самый большой репертуар сетевой активности и способность к координации своих сегментов на больших расстояниях [23].

Д. Чиальво приводит эволюционные причины в пользу значения критических состояний. Он считает, что в мире подкритических мозгов все представления должны быть единообразными, воспоминания – неизменными, а извлечение нового знания – невозможным. В мире сверхкритических мозгов все меняется без каких-либо явных закономерностей: никакая долгосрочная пластичность и память обучению не помогут. Лишь в нашем мире критических мозгов последние способны не только фиксировать неожиданные события и выявленные закономерности, но и редактировать сохраненные воспоминания [13].

С. Фуджисава с соавторами утверждают, что самая высокая чувствительность к небольшим флуктуациям наблюдается именно в равновесной точке фазового пространства мембранных потенциалов. Японские нейрофизиологи осуществили внутриклеточную запись внутренних состояний (мембранных потенциалов) пирамидальных клеток CA3 и пришли к выводу, что они иерархически упорядочены и подчиняются степенной функции. Исследователи уверены, что эти колебания важны для функционирования мозга, однако признают, что мало понимают, по каким причинам они возникают и поддерживаются. Измерение соседних нейронов показало, что внутренние состояния были когерентными как по умолчанию, так и после стимуляции отдельных нейронов из всего измерительного пула. Согласно авторам

публикации, это означает, что активации одной нервной клетки достаточно, чтобы сдвинуть состояние всей локальной сети [17]. Важно иметь в виду, что в данном случае речь идет не о когеренции квантовой природы, а о корреляционной зависимости электрических потенциалов отдельных нейронов, которую обнаружили еще в 1950-е годы.

Допустим, все перечисленные доказательства надежны и мы действительно имеем дело с естественным механизмом, способным амплифицировать некие сигналы изнутри отдельного нейрона – распространять его по всей нервной сети, синхронизируя состояния других нервных клеток. Для теории квантового мозга важен ответ на вопрос, способен ли он усилить некое нетривиальное квантовое событие в мембране или аксоне, например туннелирование отдельного электрона. Явных причин считать, что это невозможно, нет.

Именно эти соображения вдохновили многих натурфилософов на то, чтобы принять точку зрения индетерминизма относительно проблемы свободы воли. Вот как она выглядит в изложении популярного американского нейрофизиолога и «нейроэкономиста» П. Глимчера: «данные свидетельствуют о том, что напряжение мембраны является продуктом взаимодействий на атомном уровне, многие из которых регулируются квантовой физикой и, следовательно, являются действительно неопределенными событиями» [18, р. 32]. Как нейроэкономист Глимчер придает этому выводу значительный онтологический вес, поскольку нейроэкономика декларирует своей целью объяснение человеческого поведения. Более того, представители этой дисциплины считают, что изучение экономического поведения способно улучшить наше понимание устройства мозга, а нейрофизиология вполне пригодна для коммерческих целей [19]. В самом деле, разве стоит недооценивать простой факт, что женщины обычно более импульсивны как покупатели? Некоторые экономисты пошли в своих рассуждениях настолько далеко, что стали доказывать, что эмансипация женщин как идеология была специально сконструирована по заказу капиталистов, для того чтобы женщины могли свободно распоряжаться деньгами и имели право ходить по базару без сопровождения мужчин.

Ирландский генетик, автор популярной книги по квантовой эволюции и сторонник полевой теории сознания Дж. Мак-Фадден сделал сходные обобщения: «Если нейроны, зависящие от динамики отдельных мембранных белков, имеют решающее значение для инициации определенного моторного действия или когнитивного процесса, то последующее действие или когнитивный процесс будут подвержены не-

детерминированной квантовой динамике» [29, p. 54]. В 2002 г. Мак-Федден предложил экзотическую «теорию» сознательного электромагнитного информационного поля (conscious electromagnetic information field, SEMI-field), утверждающую, что сознание является тем компонентом электромагнитного поля мозга, который загружается в моторные нейроны.

Если явления квантовой спутанности действительно носят масштабный характер, то внутренние тонкие физические состояния множества нейронов, инициированных неким «пусковым» нейроном, в котором имело место даже вполне ординарное (или тривиальное, – в терминологии Д. Чиальво) квантовое событие, должны сохранять квантовое число «пускового» события.

Десятилетие назад А. Вазири и М. Пленио исследовали резонансные явления в кальциевых каналах, будучи вдохновленными работами, доказывающими долгоживущую квантовую когерентность при переносе энергии на разных стадиях фотосинтеза. Физики модулировали проводимость ионных каналов переменными внешними электрическими полями. Их вывод звучит следующим образом: «проявление резонанса проводимости ионных каналов... может служить сигнатурой квантовой когерентности в такой системе» [40]. В 2014 г. Г. Ваттаи и соавторы в статье «Квантовая биология на грани квантового хаоса» заявили: «...Последние расчеты показывают, что квантовая когерентность может стать долгоживущей в сложных системах, которые находятся в критическом состоянии между хаосом и регулярностью – на грани квантового хаоса» [39].

Однако является ли усиление индетерминистских событий до макромасштабов нормальным режимом функционирования мозга? Если этот феномен повсеместный, то наш здравый смысл должен склонять нас к отрицательному ответу.

Значительную полемику вызвали недавние работы М. Фишера [16] и впоследствии примкнувших к нему С. Вайнгартена и П.М. Дорайсами. Они предположили существование механизма квантовых вычислений на субклеточном уровне, основанном на квантовой спутанности молекулы фосфата кальция в нейронах [41]. Фишер обратил внимание на проведенные в 1986 г. сотрудниками Корнельского университета эксперименты на крысах с использованием разных биодобавок, содержащих литий-6 и литий-7 [33]. Его поразило, что после рождения потомства у крыс, получавших литий-6, материнский инстинкт был развит гораздо сильнее, чем у получавших литий-7. Иссле-

дователь предположил, что причина разного действия заключается в спине ядра, поскольку именно это квантовое свойство влияет на то, как долго каждый из атомов может оставаться когерентным, в результате литий-7 теряет когерентность слишком быстро, а литий-6 может оставаться запутанным дольше. Впоследствии Фишер обратил внимание на фосфор, утверждая, что это уникальный биологический элемент, поскольку его ядерный спин может служить кубитом для предполагаемых квантовых вычислений («нейронным кубитом»), в то время как ион фосфата является единственным возможным переносчиком кубитов.

Необходимое требование для квантовых вычислений – наличие квантовой запутанности. Согласно Вайнгартен, Дорайсвами и Фишеру ключевую роль в этом играет так называемая молекула Познера, или $\text{Ca}_9(\text{PO}_4)_6$, которая способна «защищать» нейронный кубит длительное время и таким образом выполнять роль памяти. Механизм следующий. Химическая реакция может запутывать пары кубитов, расщепляя пирофосфатный ион на два фосфатных иона. Познеровские молекулы, образованные связыванием таких фосфатных пар с внеклеточными ионами кальция, наследуют спутанность ядерных спинов. Далее предполагается некий механизм транспорта познеровских молекул в пресинаптические нейроны во время эндоцитоза везикул. Затем молекула в результате реакции высвобождает поток внутриклеточных ионов кальция, которые способны активировать нейротрансмиттер и увеличивать вероятность постсинаптического запуска нейронов. Фишер и его соратники делают смелое обобщение, что именно многочисленные запутанные молекулы Познера, запускающие «нелокальные квантовые корреляции уровней возбуждения нейронов, являются ключевым механизмом нейронной квантовой обработки» [41]. Однако попытки подтвердить эти предположения экспериментально, предпринятые Фишером, оказались неудачными.

Идея о существовании «беспроводной» – индуктивной связи между соседними нейронами возникла еще в середине XIX в. Эксперименты немецкого физиолога Э. Дюбуа-Реймона показали, что срабатывание одного нерва может вызывать срабатывание нерва соседнего. Этот эффект был назван вторичным возбуждением. Примерно столетие спустя, в 1940 г., Б. Кац и О. Шмидт исследовали электрическое взаимодей-

вие двух соседних нервов конечностей краба *Carcinus maenas*, более известного как зеленый краб. Они установили, что токи, которые вызывали деполяризацию (возбуждение) мембраны активного нерва, вызывали соответствующую гиперполяризацию (торможение) соседнего волокна. Исследователи также отметили, что стимуляция обоих нервов может вызвать интерференционные эффекты. Одновременное возбуждение потенциала действия вызывало помехи и приводило к снижению скорости проводимости, в то время как слегка смещенная стимуляция приводила к синхронизации двух импульсов [24]. Год спустя французский нейрофизиолог греческого происхождения А. Арванитаки также исследовал этот интересный феномен и ввел термин «эфапс» (от греч. *ephapsis* – «трогать»), означающий способ трансляции нервной информации, отличный от синаптической передачи. Со временем термин «эфаптическая передача» стал использоваться в более общем смысле для описания эффектов, вызываемых любыми изменениями поля вдоль клеточной мембраны [6].

Обычно эфаптическая передача считается негативным феноменом, поскольку заметным образом проявляется в случае демиелинизации аксона: теряя должную изоляцию, он начинает влиять на параллельные аксоны. Иными словами, данное явление можно отнести к межаксонным помехам. Это может стать причиной аномальных ощущений, невралгических болей, каузальгии. Можно предположить, что причиной аномальных ощущений, синестезии является передача информации с аксона, специализирующегося на передаче сенсорной информации одного типа (например, зрительной), на аксон, ответственный за информацию другого типа (например, слуховую). В самом деле, логично допустить, что в основе феноменов, когда зрительные ощущения вызывают ощущения слуховые, должна лежать некая аномальная передача информации между областями мозга, в норме непосредственно не коммутирующими.

Проведенное в 2010 г. исследование К. Анастасио и его коллег установило, что потенциалы локального поля в кортикальных нейронах могут служить для синхронизации нейрональной активности в периоды повышенной возбудимости или депрессии [4]. Хотя авторы исследования признают, что синхронизация нейронов скорее является нежелательной, они делают осторожное допущение о положительной роли эфаптической связи: «Наши результаты подтверждают представление о том, что осциллирующие электрические поля, присутствующие в сером веществе, служат синхронизации активности нейронов, при

этом фактор характера активности (возбуждение или торможение) учитывается незначительно. Такая синхронизация может оказать существенное влияние на обработку нейронной информации и нейропластичность» [4].

Опираясь на эту работу, Дж. Аль-Халили и Дж. МакФадден в 2014 г. в своей книге «Жизнь на грани: Наступление эпохи квантовой биологии» выдвинули гипотезу, согласно которой квантовые события, например на уровне ионных каналов, могут влиять на внеклеточные электрические поля, которые генерируются на уровне нейронов и их сетей, и/или подвергаться влиянию этих полей. Авторы исходят из того, что Анастасио и Перин доказали, что внеклеточные поля способны влиять на мембранный потенциал нейронов и их пиковую активность с помощью эфаптической передачи. Далее они допускают, что электрические поля могут управлять возбуждением множества нейронов и синхронизировать его и таким образом влиять на когнитивные функции и поведение. Поскольку электрические поля связаны с уровнем квантовых когерентных событий во многих нейронах, модулируя активность ионных каналов (и модулируясь ею), они могут потенциально влиять на синхронность нейронного возбуждения, которая проявляется в когнитивных функциях и поведении [3].

Таким образом, несинаптическая связь считается скорее негативным феноменом функционирования нервных тканей, который должен был эволюционно подавляться для минимизации логических ошибок. Даже если это действительно так, это не значит, что в отдельных случаях данный феномен мог закрепиться в качестве положительного эволюционного механизма. Подобных примеров в биологии можно найти множество. П. Джедлика утверждает, что биологическая эволюция способна использовать в своих интересах нетривиальные квантовые события на микроскопическом уровне и даже на более масштабных уровнях. При этом он подчеркивает, что истинность данного утверждения не зависит от правдоподобности или обоснованности собственно квантовой теории сознания.

В. ван Натерс считает, что нейроны в обонятельной системе немиелинизированы и плотно упакованы, в результате чего эффекты эфаптической связи более заметны [38]. Отсутствие миелиновой изоляции очевидным образом говорит в пользу того, что несинаптическая связь в обонятельной системе является эволюционной нормой.

В 2001 г. было опубликовано исследование Х. Бокила с соавторами, которые изучали эфаптическую передачу в обонятельной системе

млекопитающих. Добавление эфаптической связи в модель обонятельных нейронов согласуется с теорией выделенной линии, согласно которой каждый обонятельный рецептор посылает сигнал одному нейрону. Авторы исследования считают, что ингибирование, обусловленное эфаптической связью, может содействовать интеграции сигналов, что приводит к более тонкому восприятию запахов [9]. В самом деле, способность обонятельной системы порой воспринимать самое ничтожное количество молекул является удивительной и малопонятной.

В 2008 г. М. Пленю и С. Хелга описали квантовые эффекты в обонятельной системе, предположив, что электронное туннелирование играет важную роль в обнаружении одорантов обонятельными рецепторами. Как известно, одоранты – это сильно пахнущие примеси к газам, которые даже в самых незначительных концентрациях способны вызывать ощущения. Также эти авторы допускают, что именно долгоживущие квантовые спутанности в криптохромах сетчатки, поддерживают чувствительность птичьего глаза к магнитным полям [31]. Х. Хискок с коллегами посвятили механизму магниторецепции отдельное исследование и настаивают, что им впервые удалось объяснить точность порядка 5° , с которой перелетные птицы могут определять вектор геомагнитного поля. «...На основании компьютерного моделирования, – пишут они, – мы показываем, что подлинно квантовомеханические долгоживущие спиновые когерентности в реалистичных моделях криптохрома могут обеспечить необходимую точность навигации птиц» [22]. Можно ли результаты компьютерного моделирования принимать во внимание в таких тонких вопросах физических взаимодействий? Вероятно, да, но в качестве доказательств они, очевидно, не годятся.

Эксперименты В. Ловенштайна с использованием методов спектроскопии высокого разрешения и ядерного магнитного резонанса выявили признаки квантовой когеренции в молекулах белка родопсина – основного зрительного пигмента, выполняющего функцию фоторецепции в клетках-палочках [27].

Попытки обнаружить квантовые эффекты не ограничиваются исследователями нервной системы. Имеются данные о «неожиданно длительной квантовой когерентности в переносе электронов, которая участвует в фотосинтезе» [30], настолько впечатляющие получивших их авторов, что они предлагают использовать обнаруженный нетривиальный механизм обмена энергией между белком и хромофором для создания новых приемников солнечной энергии для электростанций.

А. Чену и Г. Шолз сообщают, что они обнаружили квантовую когерентность в фотосинтезирующих бактериях, а также в морских водорослях [12].

М. Арндт [5] и Дж. Брукс [10] также утверждают, что в живых системах наблюдались нетривиальные квантовые процессы. Впрочем, М. Арндт его коллеги признают скромный масштаб успехов: «В настоящее время экспериментальные демонстрации квантовой когерентности в биологии все еще ограничены уровнем нескольких молекул. Это включает, например, всю квантовую химию, туннельные процессы, транспорт когерентного возбуждения и локальные спиновые эффекты» [5].

Относительно вопроса об истинности гипотезы квантового мозга мы имеем дело с оптимистами – сторонниками идеи амплификации квантовых свойств до макроуровней организации мозга и пессимистами, полагающими, что квантовые свойства усредняются глубоко на субклеточном уровне и не участвуют в вычислительных процессах. Сегодня позиции пессимистов, очевидно, сильнее. Однако еще до недавнего времени в распоряжении оптимистов не было вообще ничего, кроме натурфилософских интуиций и теоретических спекуляций. Как было продемонстрировано, к настоящему моменту накопилось изрядное количество эмпирических свидетельств, заслуживающих самого пристального внимания.

В некотором смысле наблюдаемая полемика является специфической формой спора редуccionистов и антиредуccionистов. Сторонники амплификации настаивают на том, что фундаментальные квантовые свойства физической организации мозга обладают объяснительной силой как минимум на биологическом уровне (теория квантового мозга), а наверняка и на психологическом (квантовая теория сознания). Антиредуccionисты утверждают, что квантовые свойства присущи только такому фундаментальному физическому уровню организации «куска материи», как мозг. Эта точка зрения является вполне характерной для эмерджентизма, учения о формах движения материи и многочисленных разновидностей дуализма психофизических свойств. Согласно этим учениям каждому уровню движения материи присущ свой набор свойств, которые без потери полноты знания несводимы к свойствам нижележащих уровней. Эта несводимость является неким нега-

тивным познавательным качеством, – гносеологическом ограничением, однако в основе последнего лежат вполне онтологические основания. Впрочем, такой взгляд характерен только для уровня больших философских обобщений в рамках психофизических концепций.

Большинство представителей конкретных наук будут способны привести множество контрпримеров. Строго говоря, редукционизм у большинства амплификаторов является весьма ограниченным, они не утверждают, что квантовыми свойствами можно объяснить все ментальные свойства и все человеческое поведение. Скорее речь идет о том, что существуют «сквозные» квантово-механические свойства. Это допущение выглядит смело, но на фоне того, что нам известны сквозные свойства в классической физике, оно не столь фантастично: мозг целиком обладает массой, плотностью, электрическим сопротивлением, емкостью и т.п. Нельзя сказать, что эти интегральные физические свойства имеют большой объяснительный потенциал, но он далеко не нулевой.

Следует также обратить внимание на тот интересный факт, что гипотеза квантового мозга реанимировала индетерминистский дискурс о свободе воли. Если сторонники теории амплификации квантовых свойств правы и она существует, это должно иметь следствием неожиданный ответ на вопрос о природе человека и его месте в мире. С этой точки зрения все существа, обладающие нервной системой, предстают как полноценные агенты мира первозданного хаоса, т.е. они являются устройствами, способными усиливать случайные события квантово-механического мира до макромасштабов, реализуя их не только во внутренних состояниях своего мозга, но и вовне – в своем поведении.

Литература

1. Винник Д.В. Квантовые теории сознания: метафизические спекуляции и конкретно-научное содержание // Философия науки. – 2018. – № 3 (78). – С. 114–133.
2. Aaronson S. The Ghost in the Quantum Turing Machine/ – URL: <https://www.scottaaronson.com/papers/giqtm3.pdf> (дата обращения: 12.12.2019).
3. Al-Khalili J.S., McFadden J. Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology. – Random House, Transworld Publ., 2014.
4. Anastassiou C.A., Perin R., Markram H., Koch C. Ephaptic coupling of cortical neurons // Natural Neuroscience. – 2011. – No. 2. – P. 217–223. – URL: http://www.gatsby.ucl.ac.uk/~beierh/neuro_jc/Anastassiou_etal11_EphapticCoupling.pdf (дата обращения: 12.12.2019).
5. Arndt M., Juffmann T., Vedral V. Quantum Physics Meets Biology. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2839811/> (дата обращения: 12.12.2019).

6. *Arvanitaki A.* Effects Evoked in an Axon by the Activity of a Contiguous One // *Journal of Neuropsychology*. – 1942. – Vol. 5. – No. 2. – URL: <https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/jn.1942.5.2.89> (дата обращения: 12.12.2019).
7. *Beggs M.* Neuronal avalanche // URL: http://www.scholarpedia.org/article/Neuronal_avalanche (дата обращения: 12.12.2019).
8. *Beggs J.M., Plenz D.* Neuronal avalanches in neocortical circuits // *The Journal of Neuroscience*. – 2003. – No. 23. – P. 11167–11177. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6741045/> (дата обращения: 12.12.2019).
9. *Bokil H., Laaris N., Blinder K., Ennis M., Keller A.* Ephaptic interactions in the mammalian olfactory system // *Journal of Neuroscience*. – 2001. – No. 20. – P. RC173.
10. *Brookes J.C.* Quantum Effects in Biology: Golden Rule in Enzymes, Olfaction, Photosynthesis and Magnetodetection. – URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2016.0822> (дата обращения: 12.12.2019).
11. *Burkitt A.N.* A Review of the Integrate-and-Fire Neuron Model: I. Homogeneous Synaptic Input. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16622699> (дата обращения: 12.12.2019).
12. *Chenu A., Scholes G.D.* Coherence in energy transfer and photosynthesis // *Annual Review of Physical Chemistry*. – 2015. – No. 66. – P. 69–96.
13. *Chialvo D.R.* Emergent complex neural dynamics // *Nature Physics*. – 2010. – No. 6. – P. 744–750. – URL: <http://www.chialvo.net/Curso/UBACurso/DIA10/Papers/Chialvo2010nphys1803.pdf> (дата обращения: 12.12.2019).
14. *Davies P.C.W.* Does quantum mechanics play a non-trivial role in life? – URL: https://cs.uwaterloo.ca/~cdimarco/pdf/cogsci600/5_Davies.pdf (дата обращения: 12.12.2019).
15. *Deco G., Jirsa V.K.* Ongoing cortical activity at rest: criticality, multistability, and ghost attractors // *Journal of Neuroscience*. – 2012. – No. 10. – P. 3366–3375. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6621046/> (дата обращения: 12.12.2019).
16. *Fisher M.P.A.* Quantum cognition: The possibility of processing with nuclear spins in the brain // *Annals of Physics*. – 2015. – No. 362. – P. 593–602.
17. *Fujisawa S., Matsuki N., Ikegaya Y.* Single neurons can induce phase transitions of cortical recurrent networks with multiple internal states // *Cerebral Cortex*. – 2006. – No. 16. – P. 639–654.
18. *Glimcher P.W.* Indeterminacy in brain and behavior. *Annual Review of Psychology*. – 2005. – No. 56. – P. 25–56.
19. *Glimcher P.W.* *Neuroeconomics: Decision Making and the Brain*. – London: Academic Press, 2014.
20. *Hahn G., Petermann T., Havenith M.N., Yu S., Singer W., Plenz D. et al.* Neuronal avalanches in spontaneous activity in vivo // *Journal of Neurophysiology*. – 2010. – No. 104. – P. 3312–3322. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3007625/> (дата обращения: 12.12.2019).
21. *Herz A.V., Hopfield J.J.* Earthquake cycles and neural reverberations: Collective oscillations in systems with pulse-coupled threshold elements // *Physical Review Letters*. – 1995. – Lett. 75. – P. 1222.
22. *Hiscock H.G., Worster S., Kattvig D.R., Steers C., Jin Y., Manolopoulos D.E. et al.* The quantum needle of the avian magnetic compass // *Proc. Natl. Acad. Sci.* – 2016. – No. 113. – P. 4634–4639. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4855607/> (дата обращения: 12.12.2019).
23. *Jedlika P.* Revisiting the Quantum Brain Hypothesis: Toward Quantum (Neuro)biology? // *Frontiers in Molecular neuroscience*. – 2017. – Nov. 7. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5681944/#B7> (Дата обращения: 12.12.2019).

24. *Katz B, Schmitt O.H.* Electric interaction between two adjacent nerve fibres // The Journal of Psychology. – 1940. – No 4. – 471–488. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1393925/> (дата обращения 12.12.2019)
25. *Koch C.* Free will, physics, biology, and the brain // Downward Causation and the Neurobiology of Free Will. – 2009. – P. 31–52.
26. *Koch C., Hepp K.* Quantum mechanics in the brain // URL: <https://www.nature.com/articles/440611a> (дата обращения 12.12.2019).
27. *Loewenstein W. R.* Quantum Sensing // Physics in Mind: A Quantum View of the Brain. – 2013. – Chap. 5. – N.Y.: Basic Books.
28. *London M., Häusser M.* Dendritic computation / Annual Review of Neuroscience. – 2005. – No. 28. – P. 503–532.
29. *McFadden J.* The conscious electromagnetic information (cemi)field theory: the hard problem made easy? // Journal of Consciousness Studies. – 2002. – No. 9. – P. 45–60.
30. *Panitchayangkoon G., Voronine D.V., Abramavicius D., Caram J.R., Lewis N.H.C., Mukamel S. et al.* Direct evidence of quantum transport in photosynthetic light-harvesting complexes // URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3248508/> (дата обращения: 12.12.2019).
31. *Plenio M.B., Huelga S.F.* Dephasing-assisted transport: quantum networks and biomolecules // The Journal of Physics. – 2008. – Vol. 10. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/10/11/113019/meta/> (дата обращения 12.12.2019)
32. *Satinover J.* The Quantum Brain: The Search for Freedom and the next Generation of Man. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc, 2001.
33. *Sechzer J.A., Lieberman K.W., Alexander G.J., Weidman D., Stokes P.E.* Aberrant parenting and delayed offspring development in rats exposed to lithium // Biological Psychiatry. – 1986. – No. 13. – P.: 1258–1266.
34. *Sompolinsky H.* Scientific perspective on human choice // Judaism, Science, and Moral Responsibility. – N.Y.: Rowman & Littlefield, 2005. – P. 13–44.
35. *Stassinopoulos D., Bak P.* Democratic reinforcement: A principle for brain function // Physical Review E. – 1995. – No. 5. – P.: 5033–5039.
36. *Tegmark M.* The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes – URL: <http://cds.cern.ch/record/392718/files/9907009.pdf> (дата обращения: 12.12.2019).
37. *Turing A.M.* Computing machinery and intelligence // Mind. New Series. – 1950. – Vol. 59, No 236. – P.: 433–460.
38. *Van der Goes van Naters W.* Inhibition among olfactory receptor neurons // Frontier in Human Neuroscience. – 2013. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3805947/> (дата обращения: 12.12.2019).
39. *Vattay G., Kauffman S., Niiranen S.* Quantum biology on the edge of quantum chaos. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3945778/> (дата обращения: 12.12.2019).
40. *Vaziri A., Plenio M.* Quantum coherence in ion channels: resonances, transport and verification // New Journal of Physics. – 2010. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/12/8/085001> (дата обращения 12.12.2019).
41. *Weingarten C.P., Murali Doraiswamy P., Fisher M.P.A.* A new spin on neural processing: quantum cognition // Froniers in Human Neuroscience. – 2016. – URL: https://www.researchgate.net/publication/309447970_A_New_Spin_on_Neural_Processing_Quantum_Cognition (дата обращения: 12.12.2019).

References

1. *Vinnik, D.V.* (2018). Kvantovye teorii soznaniya: metafizicheskie spekulyatsii i konkretno-nauchnoe sodержanie [Quantum theories of consciousness: metaphysical speculations and specific scientific content]. *Filosofiya nauki [Philosophy of Science]*, 3 (78), 114–133.
2. *Aaronson, S.* The ghost in the quantum Turing machine. Available at: <https://www.scottaaronson.com/papers/giqtm3.pdf> (date of access: 12.12.2019).
3. *Al-Khalili, J.S. & J. McFadden.* (2014). *Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology*. Random House, Transworld Publ.
4. *Anastassiou, C.A., R. Perin, H. Markram & C. Koch.* (2011). Ephaptic coupling of cortical neurons. *Natural Neuroscience*, 2, 217–223. Available at: http://www.gatsby.ucl.ac.uk/~beierh/neuro_jc/Anastassiou_etall11_EphapticCoupling.pdf (date of access: 12.12.2019).
5. *Arndt, M., T. Juffmann & V. Vedral.* Quantum Physics Meets Biology. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2839811/> (date of access: 12.12.2019).
6. *Arvanitaki, A.* (1942). Effects evoked in an axon by the activity of a contiguous one. *The Journal of Neurophysiology*, Vol. 5, No. 2. Available at: <https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/jn.1942.5.2.89> (date of access: 12.12.2019).
7. *Beggs, M.* Neuronal Avalanche. Available at: http://www.scholarpedia.org/article/Neuronal_avalanche (date of access: 12.12.2019).
8. *Beggs, J.M. & D. Plenz.* (2003). Neuronal avalanches in neocortical circuits. *The Journal of Neuroscience*, 23, 11167–11177. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6741045/> (date of access: 12.12.2019).
9. *Bokil, H., N. Laaris, K. Blinder, M. Ennis & A. Keller.* (2001). Ephaptic interactions in the mammalian olfactory system. *The Journal of Neuroscience*, 20, RC173.
10. *Brookes, J.C.* Quantum Effects in Biology: Golden Rule in Enzymes, Olfaction, Photosynthesis and Magnetodetection. Available at: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2016.0822> (date of access: 12.12.2019).
11. *Burkitt, A.N.* A Review of the Integrate-and-Fire Neuron Model: I. Homogeneous Synaptic Input. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16622699> (date of access: 12.12.2019).
12. *Chenu, A. & G.D. Scholes.* (2015). Coherence in energy transfer and photosynthesis. *Annual Review of Physical Chemistry*, 66, 69–96.
13. *Chialvo, D.R.* (2010). Emergent complex neural dynamics. *Nature Physics*, 6, 744–750. Available at: <http://www.chialvo.net/Curso/UBACurso/DIA10/Papers/Chialvo2010phys1803.pdf> (date of access: 12.12.2019).
14. *Davies, P.C.W.* Does Quantum Mechanics Play a Non-trivial Role in Life? Available at: https://cs.uwaterloo.ca/~cdimarco/pdf/cogsci600/5_Davies.pdf (date of access: 12.12.2019).
15. *Deco, G. & V.K. Jirsa.* (2012). Ongoing cortical activity at rest: criticality, multistability, and ghost attractors. *The Journal of Neuroscience*, 10, 3366–3375. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6621046/> (date of access: 12.12.2019).
16. *Fisher, M.P.A.* (2015). Quantum cognition: the possibility of processing with nuclear spins in the brain. *Annals of Physics*, 362, 593–602.
17. *Fujisawa, S., N. Matsuki & Y. Ikegaya.* (2006). Single neurons can induce phase transitions of cortical recurrent networks with multiple internal states. *Cerebral Cortex*, 16, 639–654.

18. *Glimcher, P.W.* (2005). Indeterminacy in brain and behavior. *Annual Review of Psychology*, 56, 25–56.
19. *Glimcher, P.W.* (2014). *Neuroeconomics: Decision Making and the Brain*. London, Academic Press.
20. *Hahn, G., T. Petermann, M.N. Havenith, S. Yu, W. Singer, D. Plenz, et al.* (2010). Neuronal avalanches in spontaneous activity in vivo. *The Journal of Neurophysiology*, 104, 3312–3322. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3007625/> (date of access: 12.12.2019).
21. *Herz, A.V. & J.J. Hopfield.* (1995). Earthquake cycles and neural reverberations: collective oscillations in systems with pulse-coupled threshold elements. *Physical Review Letters*, 75 (6), 1222–1225.
22. *Hiscock, H.G., S. Worster, D.R. Kattinig, C. Steers, Y. Jin, D.E. Manolopoulos, et al.* (2016). The quantum needle of the avian magnetic compass. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113, 4634–4639. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4855607/> (date of access: 12.12.2019).
23. *Jedlika, P.* (2017). Revisiting the quantum brain hypothesis: toward quantum (neuro)biology? *Frontiers in Molecular Neuroscience*, Nov. 7. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5681944/#B7> (date of access: 12.12.2019).
24. *Katz, B. & O.H. Schmitt.* (1940). Electric interaction between two adjacent nerve fibres. *The Journal of Psychology*, 4, 471–488. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1393925/> (date of access: 12.12.2019).
25. *Koch, C.* (2009). Free will, physics, biology, and the brain. In: Murphy, N., G. Ellis and T. O'Connor (Eds.). *Downward Causation and the Neurobiology of Free Will*. Berlin & Heidelberg, Springer-Verlag, 31–52.
26. *Koch C. & K. Hepp.* Quantum Mechanics in the Brain. Available at: <https://www.nature.com/articles/440611a> (date of access: 12.12.2019).
27. *Loewenstein, W.R.* (2013). Quantum sensing. *Physics in Mind: A Quantum View of the Brain*, Chap. 5. New York, Basic Books.
28. *London, M. & M. Häusser.* (2005). Dendritic computation. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 503–532.
29. *McFadden, J.* (2002). The conscious electromagnetic information (cemi)field theory: the hard problem made easy? *Journal of Consciousness Studies*, 9, 45–60.
30. *Panitchayangkoon, G., D.V. Voronine, D. Abramavicius, J.R. Caram, N.H.C. Lewis, S. Mukamel, et al.* Direct Evidence of Quantum Transport in Photosynthetic Light-harvesting Complexes. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3248508/> (date of access: 12.12.2019).
31. *Plenio, M.B. & S.F. Huelga.* (2008). Dephasing-assisted transport: quantum networks and biomolecules. *The Journal of Physics*, 10. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/10/11/113019/meta/> (date of access: 12.12.2019).
32. *Satinover, J.* (2001). *The Quantum Brain: The Search for Freedom and the Next Generation of Man*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
33. *Sechzer, J.A., K.W. Lieberman, G.J. Alexander, D. Weidman & P.E. Stokes.* (1986). Aberrant parenting and delayed offspring development in rats exposed to lithium. *Biological Psychiatry*, 13, 1258–1266.
34. *Sompolinsky, H.* (2005). Scientific perspective on human choice. In: *Judaism, Science, and Moral Responsibility*. New York, Rowman & Littlefield, 13–44.
35. *Stassinopoulos D. & P. Bak.* (1995). Democratic reinforcement: A principle for brain function. *Physical Review E*, 5, 5033–5039.

36. Tegmark M. The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes. Available at: <http://cds.cern.ch/record/392718/files/9907009.pdf> (date of access: 12.12.2019).

37. Turing, A.M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind, New Series*, Vol. 59, No. 236, 433–460.

38. Van der Goes van Naters, W. (2013). Inhibition among olfactory receptor neurons. *Frontier in Human Neuroscience*. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3805947/> (date of access: 12.12.2019).

39. Vattay, G., S. Kauffman & S. Niiranen. Quantum Biology on the Edge of Quantum Chaos. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3945778/> (date of access: 12.12.2019).

40. Vaziri, A. & M. Plenio. (2010). Quantum coherence in ion channels: resonances, transport and verification. *New Journal of Physics*. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/12/8/085001> (date of access: 12.12.2019).

41. Weingarten, C.P., P. Murali Doraiswamy & M.P.A. Fisher. (2016). A new spin on neural processing: quantum cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/309447970_A_New_Spin_on_Neural_Processing_Quantum_Cognition (date of access: 12.12.2019).

Сведения об авторе

Винник Дмитрий Владимирович – доктор философских наук, Институт философии и права СО РАН (630090, Новосибирск, Николаева, 8, e-mail: dvinstor@gmail.com)

Information about the autor

Vinnik, Dmitry Vladimirovich – Doctor of Science (Philosophy), Institute of Philosophy and Law SB RAS (Nikolaeva str. 8, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: dvinstor@gmail.com)

Дата поступления 24.09.2019