

УДК 111+68

DOI:

10.15372/PS20190306

Е.А. Безлепкин**КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В СТРУКТУРЕ МОЗГА: АНАЛИЗ ТЕОРИЙ***

В статье представлен обзор современных теорий, постулирующих существование квантовых процессов и их влияние на структуру мозга и сознания (теории Пенроуза, Фишера, Тегмарка). Основная предпосылка этих теорий заключается в интерпретации работы мозга как квантового компьютера, поэтому в статье подробно рассмотрена аналогия мозга и с классическим, и с квантовым компьютером. Показано, что к настоящему времени эти теории практически не обладают доказательной базой. Таким образом, дискуссии о степени влияния квантовых процессов на сознание в современной науке продолжаются. Автор отмечает, что современные данные из квантовой биологии показывают, что квантовые процессы в общем могут влиять на функционирование моторных и когнитивных процессов у животных и человека.

Ключевые слова: квантовая механика; квантовый компьютер; мозг; квантовая суперпозиция; когерентность; Пенроуз; Фишер; Тегмарк

E.A. Bezlepkin**QUANTUM-MECHANICAL PROCESSES IN THE STRUCTURE
OF THE BRAIN: THE ANALYSIS OF THEORIES**

The article presents a review of modern theories which postulate the existence of quantum processes and their influence on the structure of the brain and consciousness (Penrose's, Fisher's and Tegmark's theories). The main premise of these theories consists in the interpretation of the brain as a quantum computer, so the article considers in detail the analogy of the brain both with a classical and a quantum computer. It is shown that by now these theories have practically no evidence. Thus, discussions about the degree of influence of quantum processes on consciousness still continue in modern science. It should be noted that quantum biology modern data show that in general quantum processes can influence the functioning of motor and cognitive processes in animals and humans.

Keywords: quantum mechanics; quantum computer; brain; quantum superposition; coherence; Penrose; Fisher; Tegmark

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-511-00025).
© Безлепкин Е.А., 2019

Введение, или «Сложность» мозга

Головной мозг – один из самых сложноустроенных органов в теле человека. За последние десятилетия после появления таких технологий, как магниторезонансная томография (МРТ), и магнитоэнцефалография (МЭГ) произошел значительный прогресс в его изучении. Свидетельством этого может являться большое количество теорий, связанных как с устройством и работой отдельных нейронов, нейронных сетей и участков мозга, так и с устройством и работой сознания. Тем не менее еще многое в работе мозга остается загадкой. К настоящему времени ученые хорошо объяснили механизмы работы отдельных нейронов, но понимания общей картины пока нет. Иначе говоря, мы не знаем, каким образом взаимодействие нейронов приводит к целостной и согласованной работе мозга.

Для того чтобы понять, каковы масштабы строения головного мозга, следует знать, что среднее число составляющих его нейронов равняется 85 млрд. Как правило, нейрон имеет аксон и сеть из множества (от нескольких сотен до нескольких тысяч) разветвленных дендритов. Аксон – длинный отросток с множеством терминалей, служащий для проведения сигналов от нейрона к нейрону. Дендриты – короткие разветвленные отростки, проводящие сигналы через синапсы между нейроном, из которого растут, и другими нейронами. Исследование устройства и функционирования сети дендритов необходимо для понимания того, насколько сложным является один нейрон и какова его роль в процессе обработки информации.

Подсчет количества нейронов и количества возможных связей между ними приводит нас к ситуации комбинаторного взрыва, т.е. резкого экспоненциального возрастания сложности системы. Чтобы показать сложность устройства мозга, хотелось бы привести один пример. Современный процессор компании Intel Core i7 состоит примерно из 2,5 млрд транзисторов. При этом транзистор в отличие от синапса имеет, как правило, только три вывода. Если мы говорим о количестве синапсов в мозге и количестве транзисторов в процессоре, то уже виден одинаковый порядок величин, однако учет комбинаторных связей этих единиц друг с другом приводит к еще очень большому отставанию сложности устройства процессора от сложности устройства мозга.

Эти данные приведены для того, чтобы показать, что мы еще далеки от возможности моделировать мозг и от окончательных ответов на

вопросы о его устройстве и функционировании. Однако непрекращающееся увеличение сложности компьютерной техники и программного обеспечения вселяет оптимизм относительно скорости исследований устройства мозга. Так, например, за последние 20 лет огромного успеха достигли системы машинного обучения и искусственных нейронных сетей, причем благодаря не только научным открытиям, но и именно росту производительности вычислительной техники.

Количественное сравнение сделано еще и потому, что существует распространенная аналогия между мозгом и компьютером. Здесь можно привести два возражения: первое связано с тем, аналогом какого компьютера является мозг – классического или квантового; второе связано с пониманием того, является ли работа мозга и сознания вычислимой в смысле математической вычислимости.

Далее мы рассмотрим эти моменты и попытаемся понять, как ученые представляют себе мозг, сознание и возможность их моделирования.

Компьютеры, вычислимость и квантовая механика

Компьютеры. Вначале несколько слов о том, в чем разница между классическим и квантовым компьютерами.

Классические компьютеры, а если точнее, то их процессоры, как уже было сказано, состоят из транзисторов, которые могут либо пропускать ток, либо нет и таким образом выдают два значения: 0 или 1. Единица измерения количества информации, которая имеет два значения, называется битом. Процессор решает задачи последовательно: он извлекает данные и команды из памяти, вычисляет новое значение исходя из предписанной операции и помещает его обратно в память, затем цикл повторяется. Существует несколько вариантов ускорения процессов вычисления: применение суперскалярной архитектуры, многоядерных процессоров, многопоточного программирования и т.д.

Квантовый компьютер работает с единицами измерения информации, которые называются кубитами. Благодаря свойствам квантовых частиц кубиты могут иметь любое промежуточное значение между 0 и 1. Классические биты могут быть представлены как «кирпичики», из которых состоит записанная в памяти компьютера информация наподобие букв в слове. При этом каждый бит существует независимо от любого другого бита. Кубиты же должны находиться в состоянии квантовой суперпозиции. По сути, это означает, что до процесса измерения кубит находится в множестве состояний одновременно. Кроме того, кубиты

должны находиться в состоянии квантовой запутанности, т.е. в такой связи, при которой за изменением одного кубита следует изменение всех остальных. Благодаря такой организации квантовый компьютер в некотором смысле уже содержит все возможные варианты решения задачи, что позволяет одновременно или параллельно вычислить их. Отметим, что в марте 2018 г. компания Google объявила, что ей удалось построить 72-кубитный квантовый процессор Bristlecone [7].

Эта ситуация требует сравнить вычислительные мощности классического и квантового компьютеров. Приведем мнение Дж. Аль-Халили: «Если квантовый компьютер может поддерживать когерентность и запутанность в пределах всего 300 кубитов, которые потенциально могут привлечь только 300 атомов, то он в определенных заданиях может превзойти классический компьютер размером с целую вселенную» [1]. Однако ученые расходятся во мнениях относительно быстродействия квантового компьютера.

Вычислимость. Что означает утверждение о том, что мозг является аналогом компьютера: классического или квантового? Существует принцип Тьюринга, гласящий, что «возможно построить универсальный компьютер: машину, которую можно запрограммировать для выполнения любого вычисления, выполнимого любым другим физическим объектом» [2, с. 160]. По большому счету, под машиной Тьюринга, правда с некоторыми оговорками, можно понимать обычный персональный компьютер. Предположение об аналогии между мозгом и компьютером и сводится к тому, что мозг можно рассматривать как машину Тьюринга, а это, в свою очередь, означает, что процессы, происходящие в мозге, обладают свойством вычислимости. Под вычислимостью понимается возможность осуществления конечного количества операций на абстрактной машине Тьюринга. Невычислимость задачи означает невозможность решить ее за конечное количество шагов.

Как мне кажется, большинство ученых в целом принимают эту аналогию, однако существует несколько возражений. Первое связано со свойством пластичности мозга [4, с. 567], которое заключается в возможности изменения нейронных связей под действием получаемого опыта, т.е. с течением времени и с получением эмпирических и теоретических данных структура мозга меняется. Она не остается постоянной в отличие от архитектуры транзисторных связей.

Второе возражение связано с гипотезой Р. Пенроуза [3] о том, что сознание порождается определенным физическим процессом, который является невычислимым. Дж.Аль-Халими отмечает: «Пенроуз принимает

ет теоремы Геделя о неполноте в качестве отправной точки для своего аргумента, указывая вначале на то, что классические компьютеры используют формальные логические системы для формулировки утверждений. Из теоремы Геделя следует, что они также должны быть способны генерировать истинные утверждения, которые они не могут доказать. Но, как утверждает Пенроуз, люди... могут доказать истинность этих недоказуемых, но правдивых компьютерных утверждений. Таким образом, он заявляет, что человеческий разум больше, чем просто классический компьютер, так как способен на то, что называется невычислимыми процессами» [1]. Однако, как утверждает, Аль-Халили, «в равной степени возможно, что и компьютеры могут доказать истинность недоказуемых геделевских утверждений, порожденных человеческим разумом» [1].

Если попытаться обобщить эти аргументы, то, мне кажется, аналогия с компьютером может быть вполне пригодной, если рассматривать один нейрон не как логический бит (как принято, например, в отношении нейронных сетей), а как небольшой процессор. Однако в этом случае возможность моделирования такой сети ставится под вопрос ввиду вычислительной сложности системы.

Квантовая механика. Могут ли какие-либо функционально важные для работы мозга его части функционировать по законам квантовой механики? Определенно да, если учитывать размер строительных блоков мозга.

Недавние исследования показали, что «квантовая когерентность играет незаменимую роль в проводимости ионов через каналы нервов... [Однако] эти исследователи не показали способность квантовых когерентных ионов действовать как нервные кубиты, а также не показали, что они могли бы играть определенную роль в сознании... ионные каналы по крайней мере играют четкую роль в нейронных вычислениях – они лежат в основе потенциалов действия». [1]

Если говорить о мире животных, то недавно было установлено, что европейские малиновки определяют направление магнитного поля Земли благодаря эффекту квантовой запутанности между электронами [1]. Это происходит благодаря химическим реакциям с использованием пигмента криптохрома, обнаруженного в глазах птиц.

Как мы видим, квантовые процессы, происходящие на микроскопическом уровне в мозге, могут не только существовать, но и влиять как минимум на протекание простейших процессов в организме животных и человека.

Далее рассмотрим несколько теорий, так или иначе утверждающих возможность существования квантово-механических процессов в мозге и их влияния не его функционирование.

Теория Пенроуза. Основная идея этой теории – применение гипотетической концепции квантовой гравитации и концепции квантовой суперпозиции состояний системы к описанию микротрубочек, функционирование которых приводит к появлению актов сознания.

По Пенроузу, сознание возникает в результате квантовых эффектов, возникающих в микротрубочках. Микротрубочки – это нитеобразные скопления белка тубулина. Пенроуз предположил, что они могут быть рассмотрены в качестве квантовых объектов, и допустил глобальную квантовую когерентность всей совокупности микротрубочек в мозге. Предполагается, что в микротрубочках происходит так называемая объективная редукция, которая является гипотетическим процессом коллапса волновой функции в них за счет действия гравитационных эффектов на микроскопическом уровне. Объективная редукция, по Пенроузу, должна представлять новую физическую теорию, а именно теорию квантовой гравитации.

Внутренние квантовые колебания воздействуют на внешние вычисления на трубочках, производя когерентный поток, регулирующий нейронную активность мозга. Этот когерентный поток может быть интерпретирован как элементарный акт сознания. Таким образом, «сознание есть проявление квантовосцепленного внутреннего состояния цитоскелета вкуче с участием этого состояния во взаимодействии между процессами квантового и классического уровней. ...Нейроны в этой системе выполняют функции, скорее, увеличительных стекол, посредством которых микроскопические цитоскелетные процессы «поднимаются» на уровень, на котором возможно воздействие на другие органы тела – например, на мышцы. Соответственно, нейронный уровень описания, к которому сводится модное нынче представление о мозге и разуме, является не более чем тенью цитоскелетных процессов более глубокого уровня» [4, с. 574].

С этой теорией связано большое количество возражений, среди которых можем отметить следующие. Первое состоит в том, что микротрубочки «не играют ведущих ролей в обработке нервной информации. Микротрубочки поддерживают архитектуру каждого нейрона и перемещают нейротрансмиттеры вверх и вниз по его длине; но не предполагается, что они участвуют в сетевой обработке информации и отвечают за расчеты в мозге» [1]. Второе возражение касается сложности микротру-

бочек как кандидатов на роль квантовых кубитов. Кубит «состоит либо из одной частицы, либо из небольшого числа частиц, которые делают то, что требуется, на расстояниях, исчисляемых в атомах» [1]. Третье возражение заключается в том, что сегодня отсутствует теория квантовой гравитации, которая является основой объективной редукции.

Однако существует любопытное косвенное подтверждение роли микротрубочек в работе сознания, связанное с гипотетическим объяснением действия общего наркоза. «Было высказано предположение, что действие анестезирующих веществ основано на ван-дер-ваальсовых взаимодействиях, которые препятствуют нормальным переключениям тубулина. Таким образом, как только анестезирующий газ просачивается в нервную клетку, его электрические дипольные свойства останавливают работу микротрубочек» [4, с. 565].

Теория Фишера. Эта теория началась с интересного наблюдения. «В 1986 г. ученые из Корнелльского университета изучали, какое воздействие литий-6 и литий-7 оказывают на поведение крыс. После рождения потомства крысы, получавшие литий-6, демонстрировали более сильное материнское поведение, такое как уход, забота, строительство гнезд. Фишер полагает, что секрет заключается в спине ядра, квантовом свойстве, которое влияет на то, как долго атом может оставаться когерентным, т.е. изолированным от окружения... Поскольку у лития-7 и лития-6 различаются количество нейтронов, они имеют различные спины. В результате литий-7 теряет когерентность слишком быстро для работы квантового сознания, а литий-6 дольше остается запутанным» [8].

На основании интерпретации этого исследования М. Фишер предположил, что в мозге могут действовать квантовые процессы. Что необходимо для существования подобных процессов? Во-первых, нужен механизм хранения квантовой информации в кубитах. Во-вторых, кубиты должны быть запутаны. В-третьих, кубиты должны влиять на работу нейронов. В-четвертых, должен существовать механизм передачи кубитов.

Фишер нашел единственного кандидата на роль квантового объекта – атомы фосфора. Одиночные молекулы фосфора не могут создавать стабильные кубиты, однако когда они связываются с ионами кальция, время когерентности может быть увеличено до необходимых для влияния на сознание значений. В 1975 г. А. Познер при изучении снимков костей обнаружил кластеры кальция и фосфора, которые были названы «молекулами Познера». Фишер считает, что именно они могут быть кубитами мозга, т.е. квантовой памятью.

Теория Фишера звучит примерно следующим образом. Химическая реакция в веществе пирофосфате расщепляет его на два фосфатных иона. Взаимодействие между спинами фосфатов запутывает их. Далее ферменты разделяют запутанные фосфаты на свободные ионы, которые могут оставаться запутанными. Эти ионы могут комбинироваться с ионами кальция и атомами кислорода, превращаясь в молекулы Познера. Поскольку у кальция и кислорода спина ядра нет, критичный для длительной когерентности полупуцельный спин сохраняется.

Далее Фишер предложил механизм транспорта и квантового измерения кубитов. «Механизм транспорта познеровских молекул в пресинаптические нейроны [имеет место] во время эндоцитоза везикул. Квантовые измерения могут происходить, когда пара молекул Познера химически связывается и впоследствии распадается, выпуская поток внутриклеточных ионов кальция, которые могут вызвать дальнейшее высвобождение нейротрансмиттера и увеличить вероятность постсинаптического запуска нейронов» [6].

Таким образом, многочисленные запутанные молекулы Познера, которые запускают гипотетические квантовые корреляции в синапсах нейронов, могут являться механизмом квантовой обработки информации. Как утверждает Фишер, «если ядерный спин фосфора не используется в квантовой обработке данных, тогда квантовая механика вообще не играет роли в работе сознания на длительных промежутках» (цит. по: [8]).

Необходимо отметить, что в настоящее время нет ни подтверждающих, ни опровергающих эту гипотезу фактов, поэтому она остается открытой гипотезой.

Концепция Тегмарка. Основа гипотезы Тегмарка состоит в том, что сознание можно понимать, как одно из состояний материи. Причем он предполагает, что существует множество типов сознания, точно так же как, например, существует множество типов жидкостей или газов. Это новое состояние он обозначает термином «перцептроний» и определяет его как «самую общую субстанцию, которая субъективно ощущает саму себя» [9, р. 4].

Основания для классификации сознательной системы как некоторого нового состояния материи заключаются в выделении набора уникальных для сознания свойств, а именно принципов информации, интеграции, независимости и динамики (приводимое ниже описание принципов взято из [9]). При формулировке этих принципов М. Тегмарк обобщает теорию сознания как обработки информации Дж. Тонони.

Итак, *информационный принцип*: сознание обладает «емкостью» для хранения информации. *Динамический принцип*: сознание способно обрабатывать информацию. *Принцип независимости*: независимость от остального мира в смысле возможности обработать информацию собственными силами. *Принцип интеграции*: невозможность для сознания состоять из независимых, или отдельных, частей. Из этих принципов вытекает *принцип полезности*: развитая система записывает главным образом ту информацию, которая для нее полезна.

Попытки выявить свойства сознания, как считает Тегмарк, должны помочь решить проблему квантовой факторизации, которая заключается в следующем. «Почему сознательные наблюдатели, подобные нам, воспринимают гильбертово пространство как соответствующее классическому пространству (скажем, не пространству Фурье)? Или, в более общем виде, почему мы воспринимаем мир вокруг нас как динамическую иерархию объектов, которые сильно связаны и относительно независимы?» [9].

Если говорить более философски, то проблему можно переформулировать так: почему мы воспринимаем объективный мир как трехмерный? Из уравнений квантовой механики не следует, что воспринимаемый мир должен выглядеть именно так. Тегмарк поясняет свой вопрос следующим примером. Когда мы смотрим на стакан воды со льдом, мы воспринимаем жидкость и кубики льда как независимые друг от друга объекты. Между тем на микроуровне они являются частью одной системы. Тегмарк спрашивает: как именно происходит такое разделение, т.е. факторизация?

Ответа на этот вопрос пока что нет, но, как известно, в первую очередь необходимо поставить правильный вопрос.

Тегмарк также предполагает, что сознание функционирует подобно квантовому компьютеру. Его исследование, однако, сосредоточено не на поисках физического воплощения кубитов в мозге, а на анализе понятия «информация» и возможности квантовой обработки информации мозгом.

Заключение

Основное предположение, которое мне хотелось бы выдвинуть, заключается в том, что сознание является сложной структурой, которую надо рассматривать на разных уровнях. Предположим, что можно рассмотреть сознание как систему, состоящую минимум из трех уровней, а именно:

- 1) структурного, на котором сознание определено как совокупность феноменального фона и рефлексивного сознания [5];
- 2) пространственного, на котором сознание определено как совокупность микроскопического (субклеточный уровень) и макроскопического (сети нейронов) уровней;
- 3) функционального, на котором сознание определено как интегрированная система обработки информации.

В этом случае понятно, что на пространственном уровне могут существовать квантовые эффекты. Например, возможность когерентности частиц на микроуровне или их взаимодействие в запутанном состоянии на макроуровне. Эти эффекты могут влиять на простейшие механизмы работы мозга, например на механизмы передачи ионов в ионных каналах, механизмы ориентирования у птиц [1]. С большой долей вероятности можно предположить, что на структурном уровне, где действуют биологические, эволюционные и социальные законы, квантовые процессы вряд ли вносят какой-то вклад в функционирование сознания. Однако малоисследованным остается функциональный уровень работы сознания, природу которого как раз затрагивал в своей статье М. Tegmark. Можно предположить, что именно здесь нас могут ожидать новые прорывные открытия.

Литература

1. *Аль-Халили Дж.* Жизнь на грани: Ваша первая книга о квантовой биологии. – СПб.: Питер, 2016. – 490 с.
2. *Дойч Д.* Структура реальности. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 400 с.
3. *Петроуз Р.* Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 339 с.
4. *Петроуз Р.* Тени разума: в поисках науки о сознании. – Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 688 с.
5. *Ревонсуо А.* Психология сознания. – СПб.: Питер, 2013. – 336 с.
6. *Fisher M.* Quantum Cognition: The Possibility of Processing with Nuclear Spins in the Brain. – URL: <https://arxiv.org/abs/1508.05929>.
7. *Kelly J.* A Preview of Bristlecone, Google's New Quantum Processor // URL: <https://ai.googleblog.com/2018/03/a-preview-of-bristlecone-googles-new.html>.
8. *Ouellette J.* A New Spin on the Quantum Brain. – URL: <https://www.quantamagazine.org/a-new-spin-on-the-quantum-brain-20161102>.
9. *Tegmark M.* Consciousness as a State of Matter. – URL: <https://arxiv.org/abs/1405.0493>.

References

1. *Al-Khalili, J.* (2016). Zhizn na grani: Vasha pervaya kniga o kvantovoy biologii [Life on the Edge: [The Coming of Age of Quantum Biology]. St. Petersburg, Piter Publ., 490. (In Russ.).
2. *Deutsch, D.* (2001). Struktura realnosti [The Fabric of Reality]. Izhevsk, Regul'yamaya i Khaoticheskaya Dinamika Publ., 400. (In Russ.).
3. *Penrose, R.* (2003). Novyy um korolya: O kompyuterakh, myshlenii i zakonakh fiziki [The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics]. Moscow, Editorial URSS Publ., 339. (In Russ.).
4. *Penrose, R.* (2005). Teni razuma: v poiskakh nauki o soznanii [Shadows of the Mind: In Search for the Missing Science of Consciousness]. Moscow & Izhevsk, Institute of Computer Research Publ., 688. (In Russ.).
5. *Revonsuo, A.* (2013). Psikhologiya soznaniya [Psychology of Consciousness]. St. Petersburg, Piter Publ., 336. (In Russ.).
6. *Fisher, M.* Quantum Cognition: The Possibility of Processing with Nuclear Spins in the Brain. Available at: <https://arxiv.org/abs/1508.05929> (date of access: 08.05.2019).
7. *Kelly, J. A.* A Preview of Bristlecone, Google's New Quantum Processor. Available at: <https://ai.googleblog.com/2018/03/a-preview-of-bristlecone-googles-new.html> (date of access: 04.04.2019).
8. *Ouellette J.* A New Spin on the Quantum Brain. Available at: <https://www.quantamagazine.org/a-new-spin-on-the-quantum-brain-20161102> (date of access: 10.06.2019).
9. *Tegmark, M.* Consciousness as a State of Matter. Available at: <https://arxiv.org/abs/1405.0493> (date of access: 12.04.2019).

Информация об авторе

Безлепкин Евгений Алексеевич – кандидат философских наук, младший научный сотрудник, Институт философии и права СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Николаева 8, e-mail: evgeny-bezlepkin@mail.ru)

Information about the author

Bezlepkin Evgeniy Alekseevich – Candidate of Sciences (Philosophy), the junior scientific worker, Institute of Philosophy and Law, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (8 Nikolaeva str., Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: evgeny-bezlepkin@mail.ru)

Дата поступления 23.06.2019