

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ НАУКА СЕГОДНЯ

Е. Н. Соколов

ОЧЕРКИ ПО ПСИХОФИЗИОЛОГИИ СОЗНАНИЯ

От редколлегии. Монография, введение к которой публикуется здесь, посвящена одной из наиболее сложных и загадочных проблем науки — нейробиологической природе сознания. Как связаны психологический и нейронный уровни сознания? Для ответа на этот фундаментальный вопрос автор предлагает рассмотреть сознание в рамках сферической модели субъективных процессов, которая, в отличие от других моделей, интегрирует психофизические и нейрональные уровни анализа. Обоснованием для такого подхода служат изложенные в монографии результаты экспериментальных исследований автора и его учеников, доказавших справедливость сферической модели: приводятся данные об осознанном различении цветов, эмоций и других категорий стимулов.

Сферическая модель сознания предполагает, что отдельным актам сознания должна отвечать активность специфических нейронов. Согласно гипотезе автора такими нейронами являются функционально специализированные «нейроны сознания», которые образуют «нейронные поля», или «нейронные карты». Смена одного акта сознания другим определяется перемещением фокуса возбуждения по такой карте, в результате чего активность одного «нейрона сознания» сменяется возбуждением другого нейрона этого же класса. Из данной гипотезы вытекает ряд следствий, доступных экспериментальной проверке, и это открывает перспективу объективного изучения сознания.

Гипотеза о наличии специализированных «нейронов сознания» с необходимостью приводит автора к заключению о наличии внутриклеточного механизма сознания. В связи с этим автор рассматривает два возможных процесса: 1) локальное кодирование сигналов на микромодулях отдельных дендритов; 2) квантово-механическое кодирование в микротрубочках цитоскелета, происходящее за счет генерации когерентных фотонов. В основу второго представления положена радикальная физическая гипотеза о квантовых процессах, дающих возможность по-новому объяснить работу мозга и природу человеческого сознания.

Книга, выпускаемая факультетом психологии МГУ им. М.В. Ломоносова, вызовет несомненный интерес у широкого круга специалистов в области гуманитарных и естественнонаучных дисциплин, а также студентов старших курсов, интересующихся проблемами психологии и нейробиологии сознания.

Введение

В данной работе используется стратегия психофизиологического исследования, которая кратко может быть обозначена как «человек — нейрон — модель». Согласно этой стратегии, задачей психофизиоло-

гической науки становится выявление нейронных механизмов субъективных феноменов. Для достижения этой конечной цели психофизические данные должны быть объединены с соответствующими показателями нейронной активности в единой модели, элементами которой являются нейроподобные элементы. Такая модель при предъявлении стимулов на входе должна на выходе воспроизводить ответы, полученные психофизическими методами. Одновременно каждый нейроподобный (квази-) элемент модели должен повторять ответы реальных нейронов. Этим требованиям удовлетворяет сферическая модель когнитивных процессов (Фомин, Соколов, Вайткявичюс, 1979).

Сферическая модель состоит из набора квазирецепторов, связанных с квазинейронами-предетекторами. Квазинейроны-предетекторы формируют ансамбль, работающий параллельно с ансамблем квазинейронов-детекторов, селективно настроенных на определенные комбинации выходов квазипредетекторов, кодирующих стимулы на входе. Возбуждения квазипредетекторов формируют векторы возбуждения равной длины. Это предполагает, что стимулы на входе проецируются на сферическую поверхность в многомерном пространстве. Размерность пространства определяется числом предетекторов в ансамбле. Различия между стимулами соответствуют расстояниям между точками, представляющими стимулы на сфере.

Сферическая модель была многократно проверена на психофизическом и нейрофизиологическом уровне в отношении цветового зрения. Многомерное шкалирование матриц, составленных из субъективных оценок цветовых различий, показало, что множество цветов располагается на поверхности сферы в четырехмерном евклидовом пространстве. Субъективные различия между цветами близко совпадают с расстояниями, разделяющими цвета на сфере (Izmailov, Sokolov, 1991). При быстрой замене цветовых стимулов у испытуемых регистрируются негативные пики вызванных потенциалов с латентностью 87 мс (N87). Амплитуда N87 близко соотносится с субъективными различиями между соответствующими цветами. Многомерное шкалирование матриц, составленных из амплитуд N87, выявило четырехмерное сферическое цветовое пространство, идентичное цветовому пространству, полученному из субъективных оценок цветовых различий (Izmailov, Sokolov, 2004).

Модель относится также и к цветовой памяти. Многомерное шкалирование матрицы, составленной из субъективных оценок семантических различий между названиями цветов, продемонстрировало четырехмерное семантическое цветовое пространство, соответствующее перцептивному цветовому пространству. Быстрая замена на мониторе цветовых названий вызывает семантический негативный потенциал с латентностью пика 180 мс (N180). Амплитуды семантических N180 близко коррелируют с субъективными семантическими различиями между названиями цветов (Соколов, 2003). В соответствии с представленными данными

предполагается, что восприятия цветов и их заученных названий кодируются векторами возбуждения одинаковой длины. Различия между воспринимаемыми цветами и названиями цветов равны абсолютным значениям различий между соответствующими векторами.

Нейронные механизмы цветоразличения исследованы с использованием регистрации активности отдельных нейронов в зрительной коре кролика в парадигме замены цветowych стимулов. Было показано, что корковые нейроны с интервалами 40–90 мс генерируют спайковые разряды, которые близко коррелируют с амплитудой коркового вызванного потенциала кролика. Многомерное шкалирование матрицы спайковых разрядов, возникающих на замену цветов, выявило четырехмерное цветовое пространство, совпадающее с цветовым пространством кролика, построенным на основе матрицы амплитуд вызванных потенциалов (Полянский, Евтихин, Соколов, 2005). Сравнение спайковых разрядов нейронов зрительной коры с амплитудами вызванных потенциалов у кроликов дает возможность говорить о существовании нейронного алгоритма, определяющего абсолютные значения векторных различий как механизма измерения цветовых различий (Соколов, 2003).

Таким образом, систематическое исследование цветового зрения продемонстрировало возможности сферической модели в отношении интеграции психофизических и нейрофизиологических данных. Это открывает новые перспективы для объяснения других форм психических процессов, в том числе и сознания.

Несмотря на то что наличие сознания субъективно ощущается каждым человеком, дать его строгое определение чрезвычайно сложно. Сознание, возникающее в мозговых структурах, является сугубо личным достоянием, недоступным постороннему наблюдателю. Содержание сознания можно передать только опосредованно, в частности, с помощью устного или письменного сообщения, а также рисунков или живописи. С какими трудностями встречается такое опосредованное воспроизведение содержания сознания, иллюстрирует процесс создания фоторобота, формируемого из комбинаций отдельных черт хорошо знакомого или однажды увиденного лица. Несмотря на то что этот процесс непрерывно контролируется человеком, запомнившим лицо, фотопортрет всегда не идентичен образу, хранящемуся в памяти.

Сознание характеризуется активностью, что выражается в создании оригинальных творческих продуктов в форме планов предстоящих действий, в формулировке научных концепций, построении инженерных проектов и подготовке художественных произведений. Именно творческое начало образует ядро сознания (Pribram, 1991). Высших ступеней сознание достигает в творческом самосознании, направленном на духовное совершенствование личности.

Однако, согласно Э. Шредингеру (2000), появление и развитие сознания связано с биологической трансформацией. Хотя приобретение

индивидом умения не фиксируется на генетическом уровне, в ряде поколений привычки наследуются. Э. Шредингер объясняет этот процесс, оставаясь в рамках теории Дарвина. Мутация, приводя к изменению органа на генетическом уровне, ведет к изменению индивидуального поведения, которое определяет последующий отбор индивидов. Это иллюстрируется на примере совершенствования способности птиц к полету. Такая способность позволяет им строить гнезда на деревьях, что, в свою очередь, определяет отбор птенцов в отношении данной способности, также определяемой случайными мутациями. Через ряд поколений усовершенствованная способность летать оказывается представленной на генетическом уровне (Шредингер, 2000).

Итак, сознание можно определить как поток личных (субъективных) переживаний: смену образов, мыслей, намерений и чувств. Вопрос о механизмах сознания остается, однако, открытым. Обсуждая физический принцип, порождающий сознание, Э. Шредингер задает фундаментальный вопрос: какие материальные процессы напрямую связаны с сознанием? Отвергая приписывание сознания неживой природе, Шредингер делает шаг дальше, утверждая, что не каждый нервный процесс, более того, отнюдь не каждый церебральный процесс связан с сознанием: в сознательную сферу проникают лишь те модификации, или «дифференциалы», которые отличают новый случай от предыдущего.

Возникает вопрос: чем определяется специфичность «нейронов сознания»? На этот вопрос возможны два ответа: 1) специфика «нейронов сознания» зависит от их внутриклеточных механизмов; 2) специфика «нейронов сознания» является результатом сетевого эффекта, возникая как следствие объединяющих связей между нейронами.

Ф. Крик и К. Кох (Crick, Koch, 2002) также рассматривают гипотезу, согласно которой только определенная часть нейронов центральной нервной системы связана с сознанием. Большая часть нейронов с сознанием не связана, но подготавливает решение, окончательный результат которого представлен в виде эксплицитного образа только в специфических «нейронах сознания». Разрушение или функциональное выключение этих нейронов ведет к невозможности восприятия специфической категории объектов. Принимая гипотезу о небольшом числе «нейронов сознания», образующих репрезентацию объекта, Крик и Кох рассматривают две возможности:

1. Сознание в принципе глобально.
2. Осознанное восприятие определенной категории объектов связано с небольшой группой нейронов (по их оценкам, существует всего 100—1000 таких нейронов).

Специализацию нейронов Крик и Кох сравнивают с селективной экспрессией генов в определенном типе клеток. Рассматривая локализацию «нейронов зрительного сознания», они приводят аргументы в пользу того, что эти нейроны не связаны с первичной зрительной корой VI, а

расположены выше. Обсуждая вопрос о нейронах, воспринимающих направление движения, они подчеркивают, что электрическая микро-стимуляция нейронов области V5 в ситуации поведенческого выбора направления движения определяет такой выбор. Более того, авторы предполагают, что «зрительное сознание» связано с нейронами лобной коры. В качестве аргумента ими приводятся данные фМРТ, проведенной у больного со «слепым взглядом», у которого префронтальные поля 46 и 47 были активированы только тогда, когда он видел движущийся объект. Полное удаление лобной коры у обезьян также ведет к полной слепоте (Николлс и др., 2003), что свидетельствует о том, что «нейроны сознания» локализованы именно в этих структурах, получают информацию от гностических нейронов дорсального и вентрального отделов ассоциативной коры, а последние сами «питаются» от нейронов первичных корковых проекций, не являющихся «нейронами сознания».

В 1995 г. состоялся симпозиум, посвященный обсуждению монографии Р. Пенроуза «Тени разума» (Penrose, 1994). На нем выступил С.А. Клейн с докладом «Является ли квантовая механика адекватным способом понять сознание?». Основное возражение Клейна относительно квантово-механического толкования сознания, предложенного Пенроузом, сводилось к тому, что до сих пор все нейрофизиологические процессы не требовали для своего объяснения выхода за рамки классической физики и поэтому проблема сознания также должна решаться в рамках классической физики. По мнению Клейна, квантово-механические гипотезы относятся к области метафизики, задающей непроверяемые вопросы, и поэтому не являются предметом естественнонаучного знания. Отвечая на критические замечания относительно квантовых механизмов информационных процессов, Р. Пенроуз ссылается на работу Джibu и др. (Jibu et al., 1994), в которой рассматриваются лазер-подобные квантовые процессы в микротрубочках цитоскелета нервных клеток. Эти процессы возникают в результате взаимодействия электрических диполей молекул воды, находящихся внутри микротрубочки, с квантовым электромагнитным излучением. Микротрубочки выполняют функцию нелинейных оптических когерентных устройств. Рассматриваются два явления: сверхсветимость (superradiance) и сверхпрозрачность (supertransparency). Сверхсветимость — это квантово-механический эффект упорядочивания молекул воды в соответствии с достигнутым энергетическим уровнем и специфическим временем когерентного перехода, которое значительно короче времени тепловых флуктуаций. Самоиндуцированная сверхпрозрачность является следствием краткосрочности излучения, позволяющей избежать декогерентного влияния тепловых флуктуаций. Предполагается, что сеть микротрубочек превращает нервную клетку в оптический «компьютер». Этот оптический компьютеринг в структурах цитоскелета, вероятно, и образует субстрат сознания. В своих ответах на критику Р. Пенроуз коснулся про-

блемы отдельных нейронов как субстратов сознания. Прежде всего, он подчеркнул различие в структуре цитоскелета у нервных и остальных клеток, делая вывод, что именно нервные клетки могут быть связаны с сознанием. Развивая этот подход, можно предположить, что только «нейроны сознания» обладают цитоскелетом, в котором возможна генерация когерентных фотонов.

Исходя из этих положений, можно предложить гипотезу, согласно которой сознание (поток субъективных состояний) является формой активности специфических «нейронов сознания». Из этой гипотезы вытекает ряд экспериментально проверяемых следствий.

1. Подача стимула, вызывающего данное субъективное явление, должна приводить к активации специфического «нейрона сознания».

2. Локальная электрическая стимуляция отдельного «нейрона сознания» должна вызывать специфическое для этого нейрона субъективное явление.

3. Выключение или разрушение отдельного «нейрона сознания» должно вести к исчезновению специфического для этого нейрона субъективного явления.

Современные методы микроэлектродной регистрации нейронной активности и микростимуляции отдельных нейронов в клинике открывают перспективу объективного изучения сознания, включая проверку тех следствий, которые вытекают из гипотезы о наличии «нейронов сознания».

Важнейший прогресс на этом пути был достигнут группой, руководимой профессором Э. Холгреном. Использовались 105 электродов, вживленных в префронтальную и височную кору пациента в связи с поиском у него очага эпилептогенной активности. Были получены следующие результаты.

1. Предъявление фотографий с изображением разных эмоциональных выражений лица вызывает деполяризационный сдвиг только под одним из всех вживленных в префронтальную кору электродов. Эта локальная деполяризация возникает в правом полушарии.

2. Электрическая стимуляция, производимая через тот электрод, где возникла реакция в ответ на предъявление эмоциональных выражений, вызывала появление зрительных галлюцинаций в виде «фантомных» лиц.

3. Экстирпация эпилептогенного участка префронтальной коры вблизи от места деполяризации, приводящей к возникновению «фантомных» лиц, вызывала длительное избирательное «выключение» восприятия эмоциональных выражений лиц. Так, восстановление восприятия выражения страха не отмечалось и через три года систематических наблюдений (Marinkovic et al., 2000).

Хотя в рассматриваемой работе и не была зарегистрирована нейронная активность, в ней намечен и апробирован принцип исследования сознания. Использование же при этом регистрации нейронной актив-

ности и электрической микроstimуляции нейрона — дело методического прогресса.

Гипотеза о специфических «нейронах сознания» содержит в себе еще два следствия, которые также могут быть подвергнуты экспериментальной проверке.

1. Чем отличается «нейрон сознания» от нейрона, не связанного с сознанием? Поскольку у данного организма все клетки имеют идентичный геном, то приходится предположить, что «нейроны сознания» характеризуются экспрессией специфической комбинации генов. Следовательно «нейрон сознания» должен отличаться от нейронов, не связанных с сознанием, специфическими фрагментами иРНК и специфическими энзимами, определяющими особые свойства «нейронов сознания».

2. Процесс эволюции характеризуется эволюцией генома, которая наряду с мутациями включает дупликацию генов. Усложнение генома открывает путь для усложнения белков. Эволюция сознания — это эволюция и совершенствование «нейронов сознания» на основе эволюции генома.

Обратимся снова к Э. Шредингеру (2000), который считает, что нервная система *Homo sapiens* до сих пор подвержена филогенетическим преобразованиям. Следовательно, «нейроны сознания» на разном уровне эволюционного развития должны различаться структурой ДНК, а соответственно, и составом экспрессируемых генов.

Таким образом, гипотеза относительно существования «нейронов сознания» делает исследование сознания на нейронном и молекулярном уровнях частью нейронауки. Но вместе с тем сознание — это элемент субъективного мира. Поэтому интегральное изучение сознания принадлежит междисциплинарной области — психофизиологии.

В настоящей работе рассматривается «распределенное сознание». Предполагается, что отдельные качественно различные ощущения возникают внутри «специфических нейронов сознания», которые образуют «нейронные поля», или «нейронные карты». Смена одного ощущения другим определяется перемещением фокуса возбуждения по «нейронной карте», в результате чего активность одного «нейрона сознания» сменяется возбуждением другого нейрона. Этот принцип картирования распространяется на восприятия и семантические образования.

Возникает вопрос: где локализованы «нейроны сознания»? Разбросаны ли они по структурам мозга или сосредоточены в одном центре? Применительно к зрительным сигналам принято считать, что за зрительное восприятие отвечает зрительная кора. Однако сохранение зрительной области коры при полном удалении всех ее остальных отделов показало, что в этом случае поведенческие реакции на зрительные стимулы отсутствуют и животные ведут себя как слепые, хотя нейроны зрительной коры и отвечают на зрительные стимулы. В упоминавшейся выше работе Маринковича (Marinkovic et al., 2000) было показано, что зри-

тельные эталоны у человека возникают при локальной электростимуляции префронтальной коры. В работе, проведенной под руководством Вейскранца (Николлс и др., 2003), с помощью фМРТ было показано, что осознанное восприятие зрительного стимула активирует престриатную и дорзолатеральную префронтальную кору (поле 46). При бессознательном восприятии («слепой взгляд») активируется верхнее двуххолмие вместе с медиальной и орбитальной префронтальной корой. То, что осознанное восприятие связано с активацией дорзолатеральной префронтальной коры, а при бессознательном восприятии такая активация отсутствует, согласно Вейскранцу, свидетельствует о важности этой области в сознательных процессах. Тот факт, что престриатная кора активируется как при сознательных, так и при бессознательных процессах, говорит о том, что хотя эта область и важна для обработки зрительной информации, но непосредственно с сознанием она не связана. Это означает, что за сознание отвечает дорзолатеральная префронтальная кора, куда поступает информация от вентрального и дорзального зрительных путей. Таким образом, переход от сознательного восприятия к бессознательному связан со сменой области активации мозга: происходит переход с дорзолатеральной префронтальной коры на ее медиальный и орбитальный отделы. Это можно интерпретировать как локализацию нейронов «зрительного сознания» в дорзолатеральной области префронтальной коры. Первичная зрительная кора (V1), поставляя информацию «нейронам сознания» префронтальной коры, сама непосредственно с сознанием не связана.

Вместе с тем «нейроны сознания» и обслуживающие их нейроны образуют специализированные объединения, представляющие разные модальности. Нейроны, не связанные с сознанием, образуют нейронные ансамбли. При действии стимула в этих ансамблях возникает комбинация возбуждений, которую можно представить вектором возбуждения, постоянным по своей длине при всех действующих на данный ансамбль стимулах. Векторы возбуждения постоянной длины образуют сферу в многомерном пространстве, размерность которого определяется числом входящих в ансамбль базисных нейронов-детекторов. Вектор возбуждения, возникающий в ансамбле этих нейронов, по параллельным каналам поступает на множество нейронов-детекторов, каждый из которых обладает специфической комбинацией синаптических контактов; последнюю можно представить как вектор синаптических весов. Такие векторы синаптических весов у всех детекторов равны по своей длине. Это значит, что детекторы образуют сферическую поверхность модели. Каждый детектор умножает приходящие возбуждения на веса синаптических контактов и суммирует эти произведения, выполняя формально операцию скалярного умножения вектора возбуждения на вектор весов синаптических связей. Поскольку эти векторы равны по длине, максимально возбуждается тот детектор, вектор весов синаптических связей кото-

рого совпадает с поступающим вектором возбуждения. Таким образом, на сферической поверхности, образованной детекторами, возникает локальный фокус возбуждения, приводящий к возникновению специфического для данного детектора ощущения. Такова, в общем виде, сферическая модель когнитивных процессов, объединяющая ощущение как элемент сознания с его нейронным механизмом.

«Нейроны сознания» находятся под влиянием сигналов ретикулярной формации ствола мозга и ретикулярной формации таламуса. Первая определяет глобальное сознание, и ее отключение, инактивируя «нейроны сознания», приводит к бессознательному состоянию. Вторая образует «прожектор сознания», подсвечивающий определенный «модуль сознания» и делающий его объектом внимания. Перемещение «прожектора сознания» с одного модуля на другой обеспечивает смену объектов внимания (Crick, Koch, 2002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Николлс Дж.Г., Мартин А.Р., Валлас Б.Дж., Фукс П.А. От нейрона к мозгу. М., 2003.

Полянский В.Б., Евтихин Д.В., Соколов Е.Н. Вычисление цветовых и яркостных различий нейронами зрительной коры кролика // Журн. ВНД им. И.П. Павлова. 2005. Т. 55. № 1. С. 60—70.

Соколов Е.Н. Восприятие и условный рефлекс. Новый взгляд. М., 2003.

Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайтквявичюс Г.Г. Искусственные органы чувств. М., 1979.

Шредингер Э. Разум и материя. М.; Ижевск, 2000.

Crick F., Koch C. The problem of consciousness // Scientific American. Special edition. 2002. Vol. 12. № 1. P. 11—17.

Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Spherical model of color and brightness discrimination // Psychological Science. 1991. Vol. 2. № 4. P. 249—259.

Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Subjective and objective scaling of large color differences // Psychophysics beyond sensation / Ed. by Ch. Kaernbach, E. Schroger, H. Muller. Mahwah, NJ, 2004. P. 27—43.

Jibu M., Hagan S., Hameroff S.R. et al. Quantum optical coherence in cytoskeletal microtubules // Implications for brain function. Biosystems. 1994. № 32. P. 195—209.

Marinkovic K., Trebon P., Chanvel P., Halgren E. Localized face processing by the human prefrontal cortex // Cognitive Neuropsychology. 2000. Vol. 17 (1, 2, 3). P. 187—199.

Penrose R. Shadows of the Mind. N. Y., 1994.

Pribram K.H. Brain and perception: Holonomy and structure in figural processing. Hillsdale, NJ, 1991.