

Новиков Н.Б.

Аспирант Института психологии РАН

Россия, г. Москва

Novikov N.B.

Postgraduate Student, Institute of Psychology RAS

Russia, Moscow

НЕЙРОНЫ АНАЛОГИИ – ЭТО НЕЙРОНЫ ПАМЯТИ, ВОЗБУЖДАЮЩИЕСЯ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ.

ЧАСТЬ 1

Аннотация: В 2007 г., за три года до завершения работы над книгой «1000 аналогий, изменивших науку» [1], в которой представлен обширный историко-научный материал, отражающий процесс возникновения новых научных идей, мы задумались над тем, какие нейрофизиологические механизмы могут лежать в основе способности человека обнаруживать аналогии. При этом возникла гипотеза, что, подобно существованию различных нейронов – детекторов, избирательно реагирующих на отдельные признаки сенсорного сигнала, должны существовать нейроны, ответственные за выявление сходства (изоморфизма) между разными идеями и концепциями. Мы обсуждали данную гипотезу в стенах Института психологии РАН с профессорами М.А.Холодной и Ю.И.Александровым. В настоящее время, в связи с колоссальным прогрессом нейробиологии, появились условия для того, чтобы конкретизировать нейронные корреляты мыслительной операции аналогии. В свете новых нейробиологических знаний становится ясно, что нейроны аналогии – это нейроны памяти, которые активируются в режиме фазовой и амплитудно-фазовой синхронизации. Тем самым подводится фундамент под понятие ассоциативности мышления,

введенное Аристотелем и развивавшееся учеными 18-19 столетий (Дж.Локк, Д.Гартли, Д.Юм и т.д.).

Ключевые слова: *память, ансамбли нейронов, импульсная активность, фазовая синхронизация, ассоциативное связывание образов (идей), нейроны как детекторы совпадений, мыслительная операция аналогии.*

Abstract: *In 2007, three years before the completion of the book "1000 analogies that changed science" [1], which presents an extensive historical and scientific material reflecting the process of the emergence of new scientific ideas, we thought about what neurophysiological mechanisms might lie at the heart of a person's ability to detect analogies. At the same time, a hypothesis arose that, like the existence of various neurons - detectors that selectively respond to individual signs of a sensory signal, there should be neurons responsible for identifying similarities (isomorphism) between different ideas and concepts. We discussed this hypothesis within the walls of the Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences with professors M.A. Kholodnaya and Yu.I. Aleksandrov. At the present time, in connection with the colossal progress of neurobiology, conditions have appeared in order to concretize the neural correlates of the mental operation of analogy. In the light of new neurobiological knowledge, it becomes clear that analogy neurons are memory neurons that are activated in phase and amplitude-phase synchronization modes. Thus, the foundation is laid for the concept of associativity of thinking, introduced by Aristotle and developed by scientists of the 18-19 centuries (J. Locke, D. Hartley, D. Hume, etc.).*

Key words: *memory, ensembles of neurons, impulse activity, phase synchronization, associative linking of images (ideas), neurons as coincidence detectors, mental operation of analogy.*

1. Исследования Н.П. Бехтеревой в рамках программы расшифровки мозговых (нейродинамических) кодов психических явлений

Сформулировав задачу расшифровки мозговых (нейродинамических) кодов, то есть языка, который использует мозг при осуществлении различных когнитивных функций, Н.П.Бехтерева (1970-1980-е гг.) и ее сотрудники провели множество исследований. Требовалось ответить на вопрос, в каких формах физиологической активности нейронов отражается (кодируется) мыслительная деятельность человека, в чем заключается соответствие между этой деятельностью и электрофизиологическими явлениями, происходящими в мозге. Изучение импульсной активности нейронов различных зон коры мозга (в том числе подкорковых структур) в процессе мыслительной деятельности человека проводилось при помощи метода хронически вживленных электродов.

Первые данные, свидетельствующие о наличии закономерных перестроек частотных характеристик импульсной активности (паттернов) нейронов, были получены при восприятии, запоминании и воспроизведении отдельных вербальных стимулов. Дальнейшие исследования позволили выявить специфические особенности процессов обработки человеком вербальной информации вплоть до различных смысловых оттенков понятий. В частности, было установлено, что паттерны текущей импульсной активности нейронов некоторых структур мозга способны отражать общие смысловые характеристики слов. Выявленные всплески (или падения) частоты разрядов, возникавшие на определенных стадиях решения задачи, интерпретировались как включение или переключение работы нейронов на новый этап решения задачи.

Интересные данные были получены при изучении нейронных коррелятов мыслительной операции обобщения. Пациентам предъявлялись последовательности слов, которые могли быть обобщены по смыслу (в этом

случае требовалось назвать обобщающее понятие). Анализировалась пространственно-временная перестройка импульсной активности нейронных популяций, связанных с данным тестом (задачей). Результаты исследований отражены в работах [2, 3, 4].

Что касается современных успехов в декодировании психических явлений, то впечатляющие результаты получила научная группа Джека Галланта (2008, 2011) из Калифорнийского университета в Беркли. Ученые показали, что по активности зрительной коры можно определить, на что смотрит человек. Разработанная технология позволяла вычислить не только объект интереса испытуемого, но и характер этого объекта (человек, предмет, сцена) и даже установить, находится этот объект перед глазами сейчас или всплыл в памяти. Было доказано, что конкретные параметры физической активности мозга можно перевести в абстрактные психические состояния – в данном случае зрительные образы [5, 6].

2. Распределение элементов памяти в мозге

Важную роль в кодировании информации выполняет гиппокамп – парная структура, расположенная в медиальных височных отделах полушарий мозга. Эта структура, являющаяся частью лимбической системы головного мозга, участвует в механизмах консолидации памяти (перехода кратковременной памяти в долговременную). Специалисты отмечают, что, помимо этого, гиппокамп выделяет и удерживает в потоке внешних стимулов важную информацию, активируясь всякий раз, когда необходимо удержать в фокусе внимания внешние ориентиры, определяющие вектор поведения.

Участие гиппокампа в процессах кодирования и сохранения информации приводило многих исследователей к выводу, что наш субъективный опыт хранится в этой области мозга или в какой-либо иной специализированной структуре, связанной с гиппокампом. Однако последние исследования не

подтверждают данную точку зрения. В действительности элементы нашего субъективного опыта распределены практически по всему мозгу, причем не только в новой коре (неокортексе) больших полушарий. Тот же Джек Галлант [7] с сотрудниками составили подробную карту семантического словаря мозга, связывающего слова с их значениями, установив, что этот словарь (семантический атлас) распределен по всей коре головного мозга. С помощью магнитно-резонансной томографии исследователи регистрировали у семи добровольцев активность головного мозга, пока они в течение двух часов прослушивали радиопередачи с закрытыми глазами. За это время они успевали выслушать 15 историй, в которых содержалось около 25 тысяч слов, три тысячи из которых были уникальными. Ученые фиксировали реакцию нейронов коры головного мозга на каждое из 985 самых распространенных в английском языке слов и на основе полученных данных составили указанный выше семантический атлас. В атласе оказались задействованы обширные области коры, покрывающие более трети обоих полушарий.

Примечательно, что еще в 1970-е гг. Н.П.Бехтерева, изучая нейронную активность различных структур мозга при выполнении человеком заданий (тестов) семантического характера, обнаружила, что даже подкорковые структуры (например, ядра таламуса) участвуют в семантических операциях. Мимо этого открытия не прошел патриарх отечественной нейропсихологии А.Р.Лурия, который писал: «...Интересные результаты были недавно получены Бехтеревой и ее коллегами (1970, 1971, 1974). Используя чувствительный метод регистрации потенциалов действия отдельных групп нейронов в различных ядрах таламуса, эти авторы показали, что такие группы нейронов по-разному реагировали на различные семантические коды языка, следовательно, именно на этом глубинном уровне обнаруживалась высочайшая избирательность корковых функций» [8, с.725].

Сама Н.П.Бехтерева в книге [9] отмечает, что ее исследовательский коллектив получил диплом на это открытие: «Диплом на открытие был

получен за исследования, показавшие наличие речевых зон в подкорковых структурах. Все эти и другие наши результаты и высказанные на их основе гипотезы поначалу встречались в штыки; они обладали той степенью новизны, что оценивались первоначально как «этого не может быть», а далее неизменно приводили к позиции «ну кто же этого не знает» [9, с.320].

Эти результаты свидетельствуют о том, что элементы памяти разбросаны по всей коре полушарий мозга (и даже в подкорковых структурах). С таким заключением согласны многие нейробиологи. Так, С.В.Савельев в книге «Происхождение мозга» [10] пишет: «Память не имеет абсолютно четкой локализации. Она хранится в анализаторных центрах, ассоциативных полях и эмоционально-гормональных центрах, а связана со всем, что есть в нервной системе» [10, с.101]. Об этом же сообщают Б.Баарс и Н.Гейдж, авторы двухтомной монографии «Мозг, разум, поведение» [11]: «Полная концепция памяти человека требует участия множества областей мозга: медиовисочной коры – для эксплицитных эпизодических воспоминаний; префронтальной – для метакогнитивной памяти, сохранения и использования воспоминаний; и сенсорных областей – для перцептивных и сенсорных воспоминаний. Мозжечок и базальные ганглии во взаимодействии с лобными долями необходимы для усвоения сенсомоторных навыков. Далее, сенсорные и моторные половины коры находятся в постоянном взаимодействии друг с другом, как, например, в случае, когда мы слышим чью-то речь. Наконец, миндалина, наряду с ассоциативными зонами лимбической системы, очень тесно связана с эмоциональным научением» [11, с.539].

3. Почему исключен вариант существования небольшой популяции нейронов, реализующих мыслительную операцию аналогии

Существует несколько причин, почему мозг не может позволить себе «роскошь обладания» одной какой-либо небольшой популяцией нейронов, которая специализировалась бы на связывании (ассоциировании) разных идей и выполнении ментальной операции аналогии. Первая причина – это рассмотренный выше характер распределения памяти. Аналогия предполагает связывание разных идей (образов, воспоминаний, представлений). Эти идеи, подобно словам и их семантическому значению, могут храниться в различных структурах мозга, то есть в ансамблях нейронов, удаленных друг от друга на значительное расстояние (в масштабах мозга). По крайней мере, разные образы и воспоминания могут храниться в разных полушариях мозга.

Вторая причина состоит в том, что адаптация организма к постоянно меняющимся условиям внешней среды оказалась бы под угрозой, если бы ассоциирование образов осуществлялось небольшой популяцией нейронов. В случае гибели этой популяции или нарушения ее функции организм потерял бы способность распознавать сигналы среды как похожие (аналогичные), ошибочно воспринимая эквивалентные стимулы как новые, не встречавшиеся ранее. В этом случае серьезной проблемой стало бы извлечение из памяти схем (алгоритмов) действий, адекватных той или иной ситуации.

Наконец, третья причина – необходимость подчинить деятельность миллиарда нейронов, в том числе нейронных систем, ответственных за зрительное восприятие, слух, обоняние, осязание и т.д., одной-единственной популяции нервных клеток. При таком подчинении миллиарды нейронов должны передавать информацию, необходимую для проведения аналогий, в одну небольшую группу «привилегированных» нейронов, а те, в свою очередь, должны правильно обрабатывать эту информацию. Трудно представить такую форму организации информационных процессов.

4. Анализ условий, в которых мозг обнаруживает связь между разными идеями

Чтобы понять, как нашему мозгу удастся связывать разные элементы информации, то есть осуществлять своеобразную конвергенцию фрагментов субъективного опыта и тем самым обеспечивать нашу способность к проведению аналогий, следует рассмотреть ряд примеров такой конвергенции. Мы проанализируем четыре научных открытия, взятых из области биологии, математики, физики и химии. Первое открытие – это идея Чарльза Дарвина о том, что одной из движущих сил биологической эволюции является конкуренция между особями (борьба за существование). Второе открытие – мысль Анри Пуанкаре о том, что существует аналогия между преобразованиями, используемыми в теории автоморфных («фуксовых») функций, и преобразованиями, которые применяются в неевклидовой геометрии – геометрии Лобачевского.

Третье научное достижение, которое мы обсудим, - это идея Поля Дирака о том, что математические выкладки в матричной механике Гейзенберга имеют большое сходство со «скобками Пуассона» - математическими формулами, образующими «ядро» метода вариации произвольных постоянных, применяющегося для приближенного интегрирования уравнений движения. Отметим, что введение в квантовую механику «скобок Пуассона», заимствованных из классической механики, - один из тех результатов, за которые П.Дирак получил в 1933 г. Нобелевскую премию по физике.

Наконец, четвертая важная идея, на которой мы остановимся, - это гипотеза Гарольда Крото и Ричарда Смолли о том, что химическая стабильность молекулы углерода, состоящей из 60 атомов (молекулы C_{60}) должна объясняться так же, как устойчивость геодезических куполов Бакминстера Фуллера, имеющих икосаэдрическую форму. Открытие молекулы C_{60} , позже названной «фуллереном», и правильное объяснение ее конфигурации принесло в 1996 г. Гарольду Крото и Ричарду Смолли (а также их коллеге Роберту Керлу) Нобелевскую премию по химии.

Открытие Чарльза Дарвина. К сентябрю 1838 г. Ч.Дарвин уже пятнадцать месяцев как закончил свое знаменитое морское путешествие на корабле «Бигль». В ходе этой экспедиции он много и тщательно изучал различные виды птиц на Галапагосских островах, собрав неопровержимые доказательства эволюционного процесса, происходящего в живой природе. Убедившись в результате своих исследований в реальности эволюции, Дарвин задумался над ее механизмом. Если эволюция действительно существует, то что же приводит этот процесс в действие? Однажды Дарвин решил прочитать книгу Томаса Мальтуса «Заметки о природе народонаселения» (1798). В ней автор утверждал, что неконтролируемый рост численности людей на Земле (по экспоненциальному закону) обгоняет рост объема продовольствия и грозит катастрофой. В силу этого, по мнению Мальтуса, между различными группами людей возникают конкурентные отношения, которые он назвал «борьбой за существование» (борьбой за ресурсы).

Рассуждения Мальтуса заставили Дарвина вспомнить о проблеме, над которой он бился: каков механизм, приводящий в действие эволюцию? Другими словами, аргументы Мальтуса активировали в мозге Дарвина нейронные ансамбли, хранящие информацию об этой проблеме. Обнаружив сходство между рассуждениями Мальтуса и собственными рассуждениями об эволюции, Дарвин понял, что «механизм Мальтуса» - конкуренция между особями за ресурсы – будет способствовать тому, что наиболее приспособленные организмы выживут, а менее приспособленные погибнут. В результате наиболее удачные качества (которыми обладают выжившие) будут переданы следующему поколению организмов – в этом и состоит один из ключевых механизмов эволюции.

В своей автобиографической работе «Воспоминания о развитии моего ума и характера» [12] Дарвин пишет: «В октябре 1838 года, то есть спустя пятнадцать месяцев после того, как я приступил к своему систематическому исследованию, я случайно, ради развлечения, прочитал книгу Мальтуса «О

народонаселении», и так как благодаря продолжительным наблюдениям над образом жизни животных и растений я был хорошо подготовлен к тому, чтобы оценить значение повсеместно происходящей борьбы за существование, меня сразу поразила мысль, что при таких условиях благоприятные изменения должны иметь тенденцию сохраняться, а неблагоприятные – уничтожаться. Теперь, наконец, я обладал теорией, при помощи которой можно было работать» [12].

Таким образом, Дарвин сам сообщает, как информация, представленная в книге Мальтуса, активировала в больших полушариях его мозга нейронные ансамбли, хранящие информацию об эволюции. Аналогия между этими разными (на первый взгляд) элементами информации привела Дарвина к мысли о необходимости перенести «механизм Мальтуса» в область эволюции животных и растений.

Открытие Анри Пуанкаре. В научной деятельности великого французского математика Анри Пуанкаре однажды произошел такой же случай. Разница заключалась лишь в том, что осознание аналогии между теорией автоморфных («фуксовых») функций и неевклидовой геометрией появилось у него не после прочтения книги, как в ситуации с Дарвином, а в результате активации в мозге сразу двух воспоминаний. Первое воспоминание – это размышления Пуанкаре о тех математических преобразованиях, которые он использовал в теории автоморфных функций, а второе – мысль о том, что в неевклидовой геометрии (геометрии Лобачевского) применяются аналогичные математические преобразования. Другими словами, в мозге французского математика один нейронный ансамбль – ансамбль, хранящий информацию о теории автоморфных функций, активировал второй нейронный ансамбль – тот, который хранит знания о геометрии Лобачевского. Обнаружение аналогии (эквивалентности, изоморфизма) между двумя разными теориями открывало возможность для того, чтобы результаты одной концепции перенести в другую, обеспечив значимый прогресс последней.

Интересно, что эта активация двух нейронных ансамблей произошла в тот момент, когда Пуанкаре «заносил ногу на ступеньку омнибуса», находясь в геологической экскурсии. Дело в том, что Пуанкаре получил высшее образование, обучаясь в Горной школе, которую закончил в 1879 г. и первоначально работал простым инженером шахт третьего класса.

В очерке «Наука и метод» [13] Пуанкаре вспоминает обстоятельства, при которых его память ассоциативно связала две разные математические теории: «...Я покинул Кан, где я долго жил, чтобы принять участие в геологической экскурсии, организованной Горным институтом. Среди дорожных перипетий я забыл о своих математических работах; по прибытии в Кутанс мы взяли омнибус для прогулки; и вот в тот момент, когда я заносил ногу на ступеньку омнибуса, мне пришла в голову идея – хотя мои предыдущие мысли не имели с нею ничего общего, - что те преобразования, которыми я воспользовался для определения фуксовых функций, тождественны с преобразованиями неевклидовой геометрии. Я не проверил этой идеи; для этого я не имел времени, так как, едва усевшись в омнибус, я возобновил начатый разговор, тем не менее, я сразу почувствовал полную уверенность в правильности идеи. Возвратясь в Кан, я сделал проверку; идея оказалась правильной» [13, с.313].

Находка Поля Дирака. Теперь об открытии Поля Дирака, анализ которого приводит к выводу, что неожиданно обнаруженная аналогия может принести вам одну из самых высоких научных наград – Нобелевскую премию. Молодой Дирак изучал матричную механику – математический формализм квантовой механики, разработанный Вернером Гейзенбергом (с участием Макса Борна и Паскуаля Иордана). Основная идея матричной механики заключается в том, что физические величины, характеризующие частицу (например, атом), описываются матрицами. Эти матрицы, являясь основой матричного исчисления, допускают некоммутативность, то есть в данном исчислении не выполняется хорошо известный принцип, согласно которому «порядок множителей не влияет на произведение».

«Продираясь» сквозь сложные формулы матричной механики Гейзенберга, Дирак заметил, что содержащийся в этой механике коммутатор двух некоммутирующих величин подобен (аналогичен) «скобкам Пуассона», известным из классической механики. В частности, анализ формул Гейзенберга напомнил Дираку тот факт, что в классической механике существуют похожие формулы, а именно «скобки Пуассона» (которые, кстати, представляют собой видоизменение знаменитых «скобок Лагранжа»). То есть восприятие результатов Гейзенберга активировало в мозге Дирака нейронные популяции, хранящие информацию о «скобках Пуассона». В результате Дирак понял, что эти пуассоновские скобки можно перенести в квантовую механику и тем самым усовершенствовать ее математический аппарат. Откуда же в мозге Дирака появились эти нейронные популяции, хранящие сведения о «скобках Пуассона»? Они (эти нейроны памяти) сформировались, когда Дирак, будучи студентом,знакомился с продвинутыми курсами динамики. Чтобы проверить свою аналогию, Дирак отправился в библиотеку, где пробежался по страницам книги Эдмунда Уиттекера «Аналитическая динамика» и нашел в ней описание «скобок Пуассона», убедившись в справедливости своей догадки.

В книге «Воспоминания о необычайной эпохе» [14] Дирак подробно рассказывает о том, как в его мозге родилась великая аналогия: «В одно из октябрьских воскресений 1925 года, когда, несмотря на твердое желание отдохнуть на прогулке, я усиленно размышлял над разностью $uv - vu$, мне пришла в голову мысль о скобке Пуассона. Мне вспомнилось, что в продвинутых курсах динамики я кое-что читал о таких странных величинах, как скобки Пуассона, и мне показалось, что существует тесная аналогия между скобкой Пуассона для величин u и v и коммутатором $uv - vu$. Лишь только меня осенила эта идея, я сразу пришел в возбуждение, которое вскоре, естественно, сменилось реакцией: «Не может быть, это ошибка» [14, с.19]. «Наутро, - продолжает Дирак, - я бросился в библиотеку прямо к открытию и,

найдя в «Аналитической динамике» Уиттекера скобку Пуассона, обнаружил, что это как раз то, что мне нужно. Она была абсолютно аналогична коммутатору» [14, с.20]. «Мысль о том, чтобы связать скобку Пуассона с коммутаторами, - говорит Дирак, - положила начало моей работе в области новой квантовой механики» [14, с.20].

Эти же обстоятельства описываются в статье Дирака «Релятивистское волновое уравнение электрона» [15]: «Я обдумывал идеи Гейзенберга, особенно его идею о некоммутативности, и вдруг совершенно случайно мне пришла в голову мысль о том, что в действительности существует большое сходство между коммутатором двух некоммутирующих величин и скобками Пуассона, столь привычными нам в классической механике. Вследствие такого подобия уравнения новой механики с отсутствием коммутативности оказались аналогичными уравнениям старой ньютоновской механики, если эти привычные уравнения выразить в гамильтоновской форме. Используя эту аналогию, сразу же можно получить общую связь между старой механикой и новой гейзенберговской механикой. Это было началом моей работы» [15, с.682].

Находка Гарольда Крото и Ричарда Смолли. В сентябре 1985 г. американские ученые Гарольд Крото, Ричард Смолли и Роберт Керл открыли необычную молекулу углерода, состоящую из 60 атомов углерода, связанных друг с другом таким образом, что данная молекула обладала химической стабильностью, не разваливаясь на части. Возникла проблема объяснения этой стабильности (устойчивости), а также вопрос о пространственной конфигурации обнаруженной молекулы. Правильное решение было найдено, когда Г.Крото и Р.Смолли вспомнили о том, что устойчивые геодезические купола Бакминстера Фуллера, которые он конструировал и представлял на выставке технических достижений в Монреале в 1967 г., имеют икосаэдрическую форму. Г.Крото и Р.Смолли провели аналогию между молекулами C_{60} и геодезическими куполами Б.Фуллера. Это одна из причин,

почему эти молекулы были названы «фуллеренами». Здесь мы вновь видим, что определенный объект (необычная молекула и ее экспериментально выявленные характеристики) запускает процесс извлечения из памяти определенных знаний – знаний о другом объекте, имеющем похожие характеристики. Выражаясь языком нейробиологов (которым мы уже неоднократно пользовались), определенный экспериментальный результат активирует нейронный ансамбль, хранящий информацию о другом результате. Эта активация обусловлена сходством (подобием) воспринимаемого образа и образа, который хранится в памяти.

И.Харгиттаи взял интервью у каждого из исследователей, награжденных в 1996 г. Нобелевской премией по химии, не оставив сомнений в том, что геодезические купола Б.Фуллера помогли решить загадку многоатомной углеродной молекулы. В книге «Откровенная наука» [16] И.Харгиттаи приводит слова Г.Крото о том, как он впервые узнал о куполах Б.Фуллера: «Я подписался на «Graphis», когда наткнулся на этот журнал – в 1960-х или 1950-х гг. Это журнал по графическому искусству и дизайну, и был целый номер, посвященный Экспо-67, и была фотография павильона США, которую я хорошо помню, - фотография купола, почти целиком состоящего из шестиугольников. Я был на Экспо в 1967 г., когда работал в «Белл телефон» в Нью-Джерси» [16, с.308].

Г.Крото поясняет, как аналогия со звездными куполами Б.Фуллера привела к объяснению устойчивости молекулы C_{60} : «В конце концов, у нас была книга Фуллера, а в ней – куча шестиугольников в геодезических куполах, и была возможность замкнуть конструкцию. Мы считали, что с помощью замыкания можно избавиться от ненасыщенных связей. Критерий стабильности был одной из основных тем обсуждения в понедельник. В этот день было много разговоров. Я сходил домой на ланч с Бобом Керлом и описал этот звездный купол, так что к полудню я уже думал, исходя из звездного купола» [16, с.309].

Об этом же говорит Р.Смолли: «Однажды, когда мы с Гарри бились над вопросом, как строение больших углеродных кластеров может объяснить их четность и особое значение числа 60; чтобы лучше представить себе возможность «замкнутого решения», я спросил Гарри, кто спроектировал купола, поверхность которых, насколько я помнил, представляла собой какую-то, кажется, гексагональную сетку. Он сказал, что это был Бакминстер Фуллер. И я усмехнулся: «Вот здорово! Значит это - Бакминстерфуллерен» [16, с.328].

5. Может ли правило обучения Д.Хебба объяснить ассоциативное связывание воспоминаний (идей)?

Рассмотренные примеры автоассоциативной работы нашей памяти позволяют сделать вывод о том, что ключевая стадия мыслительной операции аналогии – это возбуждение нейронных ансамблей, хранящих ту или иную информацию, в ответ на новые стимулы (сигналы), поступающие в мозг. Эти нейронные ансамбли возбуждаются в том случае, если поступающие сигналы по своему содержанию похожи на информацию, запечатленную в указанных нейронных ансамблях (популяциях). В случае Пуанкаре нейроны памяти реагировали не на сигналы, только что поступившие в мозг и проходящие первичную обработку в зрительных или слуховых центрах мозга, а на импульсы, посылаемые другой группой нейронов памяти (нейронов, хранящих похожую информацию), но это не меняет суть дела. Во всех случаях связывание следов памяти обусловлено активацией нервных клеток, хранящих эти следы. Нейронные ансамбли как будто кричат другому ансамблю: «Мы храним сведения, содержательно совпадающие или аналогичные в определенных аспектах (признаках) той информации, которую храните Вы, соседняя группа нейронов! Значит, мы похожи друг на друга!» Подобная коммуникация между нейронами свидетельствует о том, что нейроны функционируют как детекторы совпадений, то есть клетки, способные

активироваться и связываться друг с другом при обнаружении совпадений (сходства) между разными элементами информации. Как же можно объяснить это фундаментальное свойство нейронов детектировать совпадения и ассоциировать разные сигналы?

Многие нейробиологи, отвечая на этот вопрос, обратились к великому наследию отечественного нейрофизиолога И.П.Павлова, к его выдающимся экспериментам, в которых изучался процесс формирования условных рефлексов. И.П.Павлов установил, что собаки (и другие животные) приобретают условные рефлексы благодаря тому, что мозг собаки связывает (ассоциирует) нейтральный стимул с безусловным раздражителем, если они совпадают по времени (обладают темпоральным сходством). Например, если наносить по лапе собаки электрический удар одновременно со звуком колокольчика, то после нескольких испытаний собака начнет поднимать лапу, отдергивая ее всякий раз, когда будет звучать колокольчик, даже если за этим не последует электрический удар. Это говорит о том, что мозг собаки приобрел способность связывать (ассоциировать) звук колокольчика с электрическим ударом, то есть детектировать совпадение двух разных событий и правильно реагировать на это совпадение. И.П.Павлов интерпретировал свои результаты на основе идеи о том, что между центрами мозга, участвующими в формировании условных рефлексов, устанавливается временная связь.

В 1949 г. канадский нейропсихолог Дональд Хебб перевел интерпретацию И.П.Павлова на нейронный язык, точнее, на язык синапсов – контактов, существующих между нервными клетками. Д.Хебб постулировал, что синаптические контакты между соседними нейронами, которые возбуждаются одновременно, должны усиливаться. Другими словами, когда один нейрон, возбуждающийся при звуке колокольчика, расположен поблизости от другого, который реагирует на одновременно наносимый электрический удар, то они приобретают более тесную связь между собой. Д.Хебб отметил, что

синаптическое усиление (иначе называемое «синаптическим облегчением») является нейронной основой обучения. Сегодня ученые называют концепцию Д.Хебба «правилом обучения Хебба» и формулирует это правило емкой фразой: «Возбуждены вместе – связаны вместе».

Правило обучения Хебба получило экспериментальное подтверждение в 1986-1988 гг., когда Холгер Вигстром (Holger Wigstrom) из Гетеборгского университета в Швеции провел опыты по электрической стимуляции пары нейронов в срезе гиппокампа. При этом Х.Вигстром обнаружил, что активация пресинаптического нейрона (посылающего сигнал) одновременно с постсинаптическим нейроном (принимающим сигнал) вела к повышению эффективности синапса: постсинаптический нейрон начинал активнее отвечать на прежнюю стимуляцию пресинаптического нейрона. Заслуги Х.Вигстрема в доказательстве правила обучения Хебба рассматриваются в статье Джо Циня «Код памяти» [17]. Сам Х.Вигстром описывает свои результаты в работе «Долгосрочное усиление синаптической передачи в гиппокампе подчиняется правилу синаптической модификации Хебба» [18]. Как полагают специалисты, в 2000 г. правило обучения Хебба подтверждено при исследовании нейронов гиппокампа кошки [19].

Выяснив способность коры мозга детектировать совпадения на нейронном уровне, то есть описав принципы функционирования нейронов – детекторов совпадения в понятиях активности нервных клеток и их синапсов, ученые решили определить указанный феномен детектирования совпадений на молекулярном уровне. Была сформулирована задача найти ключевые молекулы, участвующие в «синаптическом облегчении» Д.Хебба (или, другими словами, в ассоциировании сигналов при формировании условных рефлексов). И такая молекула действительно была найдена! Ею оказался рецептор NMDA – ионотропный рецептор глутамата, селективно связывающий N-метил-D-аспартат! Рецепторы NMDA пропускают в нейрон кальций тогда и только тогда, когда имеет место совпадение двух нейронных

событий – выделение нейромедиатора глутамата пресинаптическим нейроном и связывание того же глутамата постсинаптическим нейроном.

Является ли правило обучения Д.Хебба и молекула рецептора NMDA, играющая роль детектора совпадений в процессах синаптического усиления (синаптического облегчения), нейронными коррелятами эффекта ассоциирования (конвергенции) сигналов и мыслительной операции аналогии? Американский нейробиолог австрийского происхождения Эрик Кандель, удостоенный в 2000 г. Нобелевской премии за «открытия, касающиеся передачи сигналов в нервной системе», ответил: «Да, является». Этот ответ Нобелевского лауреата вполне согласуется с тем, что он долгие годы изучал механизмы обучения у аплизии – морского брюхоногого моллюска, ставя на нем те же эксперименты, что и Павлов в процессе расшифровки тайн условных рефлексов.

В книге «В поисках памяти» [20] Э.Кандель связывает правило Хебба и активность рецептора NMDA с идеями Аристотеля и британских философов-эмпириков об ассоциативности человеческого мышления: «Результаты исследований работы NMDA-рецепторов были с восторгом встречены нейробиологами, потому что показывали: эти рецепторы играют в нервной системе роль детектора совпадений. По своим каналам они пропускают в клетку кальций тогда и только тогда, когда отмечают совпадение двух нейронных событий, одного пресинаптического и одного постсинаптического. Для этого, во-первых, пресинаптический нейрон должен быть активирован и выделять глутамат, а во-вторых, AMPA-рецепторы постсинаптической клетки должны связывать глутамат и деполяризовывать клетку. Только в этом случае активируются NMDA-рецепторы, которые впускают в клетку кальций, вызывая долговременную потенциацию.

Интересно, что еще в 1949 году психолог Дональд Хебб предсказал возможность обнаружения в мозгу нейронного детектора совпадений, задействованного в обучении: «Когда аксон клетки А возбуждает клетку В и

многократно или постоянно участвует в ее активации, в одной из этих клеток или в них обеих происходят какие-то процессы роста или метаболические изменения, и эффективность работы клетки А повышается». Аристотель, а вслед за ним британские философы-эмпирики и многие другие мыслители, предполагали, что обучение и память каким-то образом обеспечиваются способностью к ассоциативной деятельности и формированию длительных мысленных связей между двумя идеями или раздражителями. Открытие NMDA-рецепторов и долговременной потенциации позволило нейробиологам выявить молекулярный и клеточный процесс, способный осуществлять эту ассоциативную деятельность» [20].

Рассуждения Эрика Канделя абсолютно справедливы для механизма формирования условных рефлексов и, скорее всего, для механизма формирования долговременной памяти (эта память, безусловно, включает процессы усиления синаптических связей между нейронами). Однако рассуждения Э.Канделя являются неверными применительно к описанию процессов одновременной активации далеко отстоящих друг от друга нейронных ансамблей, что необходимо для осуществления мыслительной операции аналогии. Как отмечено выше, память распределена по всему мозгу, и чтобы активировать и связать (конвергировать) удаленные друг от друга нейронные ансамбли, простого усиления синаптических связей между близко расположенными нейронами окажется явно недостаточно.

Рецептор NMDA, фиксирующий совпадение нейронных событий, описанных выше, и способствующий синаптическому облегчению, в данном случае ничем не поможет. Чтобы этот рецептор смог помочь, он должен усиливать контакты между удаленными нейронными популяциями, каким-то образом связывающимися и общающимися друг с другом, но в нейробиологических работах такая способность рецептора NMDA никем еще не описана. В работе [21] отмечается участие рецепторов NMDA в процессах, связанных с извлечением репрезентаций из пространственной

(навигационной) памяти, локализованной в гиппокампе, но нет данных о том, что в этом случае NMDA работает как детектор совпадений. Таким образом, правило обучения Хебба, относящееся к усилению синаптических связей между близкими нейронами, не позволяет объяснить дистантное взаимодействие нейронных популяций и, следовательно, не может быть механизмом реализации когнитивной операции аналогии.

Описав ошибку Э.Канделя, подчеркнем, что она нисколько не умаляет его выдающихся заслуг в изучении нейронных механизмов памяти. Напротив, она показывает, что этот замечательный исследователь был постоянно нацелен на проникновение в тайны мозга, смог распознать в клетках, связывающихся друг с другом по правилу Хебба, нейронный детектор совпадений. Отметим, что независимо от Э.Канделя понятие «нейронов – детекторов совпадений» ввел в науку известный израильский нейробиолог Моше Абелес (Moshe Abeles), который в 2005 г. основал в Университете Бар-Илан (Израиль) многопрофильный исследовательский центр мозга. В 1982 г. М.Абелес опубликовал статью, в которой показал, что корковые нейроны действуют как детекторы совпадений, и сформулировал идею, согласно которой кодом для высших корковых функций являются совпадения, а не частота импульсов. Речь идет о статье М.Абелеса «Роль коркового нейрона: интегратор или детектор совпадений?» [22]. Добавим, что в 1970-е гг. Н.П.Бехтерева также склонялась к заключению, что частота импульсов нейронов не может быть единственным кодом, используемым мозгом.

6. Фазовая синхронизация удаленных нейронных ансамблей как детектор совпадений более высокого уровня. Ассоциативное связывание образов (идей) через механизм когерентности нервных импульсов

Основное свойство нейронов – способность к генерации электрических импульсов (одиночных импульсов – потенциалов действия или их

последовательности). Поскольку мозг состоит из миллиардов нервных клеток, которые, объединяясь в ансамбли, выполняют самые разные когнитивные функции, природа создала механизм, обеспечивающий взаимодействие между удаленными нейронными ансамблями. Этим механизмом является фазовая (и амплитудно-фазовая) синхронизация импульсной активности нейронных популяций. Скорость установления фазовой синхронности между дистантно разобщенными группами нервных клеток значительно превосходит скорость, с которой усиливается (модифицируется) синаптическая связь между двумя нейронами при формировании условного рефлекса. Скорость возникновения фазовой синхронности также превосходит скорость распространения нейромедиаторов – химических веществ, опосредующих передачу сигналов между нейронами. Можно догадаться, что эволюция «изобрела» фазовую (и амплитудно-фазовую) синхронизацию между далеко отстоящими друг от друга нейронами, чтобы преодолеть ограничения, характерные для эффектов синаптического усиления (облегчения) и передачи сигналов с участием химических веществ (нейротрансмиттеров). Указанная скорость синхронизации нейронов вполне соответствует скорости, с которой мозг способен выполнять операцию извлечения из памяти информации, ассоциативно связанной с теми сигналами, которые поступают в мозг через органы зрения, слуха, обоняния и т.д. Другими словами, быстрота, с которой удаленные нейронные ансамбли приобретают синхронную активность, соответствует скорости, с которой мозг ассоциативно связывает содержательно похожие (аналогичные) сигналы. А такое ассоциативное связывание (конвергенция), как мы отметили выше, является ключевой стадией реализации мыслительной операции аналогии. Отсюда следует, что фазовая синхронизация нейронных ансамблей – аналог (эквивалент) того механизма детекции совпадений, который определяет синаптическое усиление при формировании условных рефлексов. Но эта синхронизация – детектор совпадений более высокого уровня, обладающий более высокой

скоростью и способный «творить чудеса» при наличии большой памяти (объем памяти зависит от массы коры мозга, а размер этой коры у человека больше, чем у его «таксономических родственников» - обезьян).

Первые эксперименты по изучению феномена синхронизации различных структур мозга провел отечественный нейрофизиолог Михаил Николаевич Ливанов (1907-1986). В одном из опытов (1938, 1940) он вырабатывал у кролика условный оборонительный рефлекс, подавая в его зрительную кору световой раздражитель, обладающий ритмическим характером. Одновременно на заднюю лапу кролика наносилось электрокожное раздражение. При анализе ЭЭГ зрительной и моторной коры животного М.Н.Ливанов обнаружил совпадающую (когерентную) ритмичность. В попытках найти правильную интерпретацию этой когерентности ученый обратился к трудам А.А.Ухтомского, первооткрывателя эффекта доминанты – возникновения устойчивого очага повышенной возбудимости нервных центров (А.А.Ухтомский установил, что принцип доминанты – универсальный механизм организации деятельности нервной системы). М.Н.Ливанов нашел в работах А.А.Ухтомского идею о том, что при выполнении того или иного акта (компонента) целенаправленного поведения в коре мозга образуются «конstellации нервных центров», то есть между различными участками мозга формируются динамические связи, которые исчезают, когда акт поведения завершен. Основываясь на этом представлении, М.Н.Ливанов дал правильное объяснение своих опытов, предположив, что в процессе выработки условного рефлекса в мозге кролика возникает синхронизация электрической активности зрительной и моторной областей.

В дальнейшем М.Н.Ливанов автоматизировал свой эксперимент, доказывающий синхронную активность удаленных структур мозга, и, соответственно, идею А.А.Ухтомского о «конstellации нервных центров». Описание этого автоматизированного опыта можно найти в статье А.М.Иваницкого и А.Н.Лебедева [23], где авторы пишут: «Компьютер

непрерывно вычислял коэффициент корреляции между колебаниями ЭЭГ в двух зонах коры кролика – зрительной и моторной. Тот же компьютер в случайном порядке подавал зрительный сигнал. Оказалось, что когда корреляция между ЭЭГ зрительной и моторной коры была высокой, кролик в ответ на вспышку света двигал лапой, то есть возбуждение в этом случае переходило от зрительной к моторной коре. <...> Особый шарм и достоверность эксперименту придает то, что он проводился машиной без участия человека. Возможность произвольных толкований здесь была сведена к минимуму» [23, с.835].

Развивая свою концепцию синхронизации биопотенциалов, М.Н.Ливанов близко подошел к тому, чтобы перенести ее с условных рефлексов на высшие когнитивные функции. В частности, анализ экспериментов Н.Е.Свидерской (1980, 1982) привел его к выводу об участии синхронизации биопотенциалов в осуществлении процессов внимания при решении интеллектуальных задач. В работе [24] М.Н.Ливанов отмечает: «Состояние психической напряженности человека находит, по-видимому, непосредственное отражение в уровне пространственной синхронизации: чем труднее задание и соответственно – выше степень мозговой активности, тем усиление пространственной синхронизации более выражено (Свидерская и др., 1980). По мере возрастания трудности задачи (о чем судили по удлинению латентных периодов ответов на вербальные задания) наблюдали параллельное усиление пространственной синхронизации (Ливанов, Свидерская, 1984)» [24, с.239].

Статья [24], в которой М.Н.Ливанов связал синхронизацию потенциалов с усилением концентрации мозга (внимания) на решаемой задаче, была опубликована в 1987 г., а уже через несколько лет исследование процессов синхронизации нейронных ансамблей приобрело взрывообразный характер. В определенной степени начало резкому увеличению числа публикаций на данную тему положила работа К.М.Грея, П.Кенига, А.К.Энгеля и В.Зингера [25], в которой сообщалось об открытии синхронизации высокочастотных

колебаний нейронов в зрительной коре мозга кошки. Название статьи вполне соответствовало сути сделанного открытия: «Колебательные реакции зрительной коры головного мозга кошки демонстрируют межколончатую синхронизацию, которая отражает глобальные свойства стимула». Отметим, что колончатое строение мозговой ткани открыл Вернон Маунткастл, автор теории модульной организации коры мозга. Авторы работы [25] пришли к выводу, что синхронизация импульсной активности клеток зрительной коры отражает процесс установления отношений между этими клетками (нейронными ансамблями) для распознавания визуальных стимулов (образов). Работа [25] в известной степени подтверждала гипотезу Кристофа вон дер Малсбурга (1981, 1986) о том, что визуальный стимул инициирует колебательную активность нейронов, кодирующих различные свойства объекта, а синхронизация этой активности обеспечивает процесс сегментации и последующего связывания свойств (признаков) объекта в единый образ. Изложение гипотезы Малсбурга можно найти в [26, 27].

В дальнейшем усилиями ученых была раскрыта роль фазовой (и амплитудно-фазовой) синхронизации между группами нейронов, выполняющих функции слухового восприятия, обоняния, внимания, формирования моторных (двигательных) программ. Было установлено, что синхронизация между нейронными ансамблями – важный механизм, обеспечивающий формирование кратковременной и долговременной памяти, а также процесс обработки семантической (речевой) информации.

Паскаль Фрис (Pascal Fries), исследователь, работавший в научной группе, которая открыла синхронную активность нейронов зрительной коры кошки, автор и соавтор таких публикаций, как [28, 29], логично подытожил результаты множества работ: «В каждый момент времени в нашем мозгу активны многие группы нейронов. Микроэлектродные записи охарактеризовали активацию отдельных нейронов, а ФМРТ выявила паттерны активации всего мозга. Теперь пришло время понять, как множество активных

нейронных групп взаимодействуют друг с другом и как их коммуникация гибко модулируется, чтобы вызвать нашу когнитивную динамику. Я предполагаю, что нейронная коммуникация механически подчиняется нейронной когерентности. Активированные нейронные группы колеблются и тем самым претерпевают ритмические колебания возбудимости, которые создают временные окна для общения. **Только когерентно колеблющиеся нейронные группы могут эффективно взаимодействовать, потому что их коммуникационные окна для ввода и вывода открыты одновременно.** Таким образом, гибкий паттерн согласованности определяет гибкую структуру коммуникации, которая поддерживает нашу когнитивную гибкость» [30, с.474].

Изучая взаимодействие гиппокампа с корой больших полушарий мозга в обеспечении процессов кратковременной и долговременной памяти, ученые выяснили, что фазовая синхронизация между нейронами имела место как при кодировании информации в памяти, так и при ее извлечении из энграмм (нейронов, содержащих следы памяти). Установлена важная роль осцилляций в диапазоне частот тета-ритма в функционировании и взаимодействии групп нейронов, связанных с памятью. Помимо этого, эксперименты показали, что фазовое взаимодействие между структурами мозга, ответственными за память, дополняется амплитудно-фазовым взаимодействием (кооперацией) [31]. Авторы работы [31] называют фазовую синхронизацию «общей нейронной сигнатурой», поддерживающей и формирующей кратковременную и долговременную память. Данные авторы убеждены, что фазовая синхронизация обеспечивает общий «нейронный протокол» для выполнения различных операций, связанных с сохранением воспоминаний (следов памяти) и извлечением этих воспоминаний из тайников памяти.

Можно выделить исследование, имеющее непосредственное отношение к нашей идее о том, что нейроны аналогии – это нейроны памяти, возбуждающиеся в режиме синхронизации, то есть ассоциативность

мышления – результат синхронной активации нейронных ансамблей, хранящих похожие (эквивалентные) сведения.

В 2017 г. Эндрю Клоутер, Кимрон Шапиро и Саймон Ханслмайр провели исследование, в котором доказали, что формирование эпизодической памяти, а также извлечение сведений из нее зависит от фазовой синхронизации, происходящей в диапазоне тета-ритма. В статье под названием «Синхронизация тета-фазы – это клей, скрепляющий ассоциативную память человека» [32] они описали эксперимент, проливающий свет на интересующие нас когнитивные процессы. Изучая паттерны активности в слуховой и зрительной коре головного мозга девяти человек с использованием электроэнцефалографии, исследователи показали, что в процессе запоминания и извлечения из памяти информации различные нейронные структуры синхронизируют свою активность в тета-ритме.

Это исследование дополняет работа американских ученых [33], в которой показано, что при вспоминании материала нейроны в коре мозга человека возбуждаются в той же последовательности, что и при запоминании информации, а успешность ответа (в задаче вспомнить слово) зависит от того, насколько эти паттерны совпадают. Исследователи выяснили, что точность извлечения информации из памяти связана с тем, синхронизируются ли всплески активности нейронов, вовлеченных в решение задачи.

В работе [34] изучалась способность макак распознавать образы, которые в разной степени отличаются от прототипа. Выяснилось, что в зависимости от степени подобия (аналогичности) сравниваемых образов включаются разные ритмы мозга и разные участки коры (разные нейронные популяции). Другими словами, степень подобия (эквивалентности) сигналов определяет, какой ритм будет включен и станет доминировать в течение определенного времени. Чем более сходны образы, тем выше сходство ритмов. Американские ученые полагают, что им удалось прояснить, как работает категориальное мышление.

Нужно отметить, что даже зрительная кора мозга функционирует на основе принципа аналогии. Группа итальянских и американских исследователей решила проверить, по какому принципу зрительная кора макаков сортирует (классифицирует) различные визуальные объекты. В серии экспериментов [35] было установлено, что нейроны зрительной коры мозга обезьян «считали» похожими предметы, близкие по форме. Визуально воспринимаемые объекты сближались на основании таких относительно простых признаков, как число элементов, яркость и контрастность. Другими словами, классификация осуществлялась по принципу схожести форм объектов. Результаты исследования [35] вызвали интересную реакцию со стороны ряда авторов. Так, например, П.Н.Барышников [36] пишет: «Итог этих исследований впечатляет – мозг обезьян кластеризует образы визуального опыта по различным критериям изоморфизма. Не в этой ли особенности мозга кроется загадка метафорического мышления?» [36, с.102].

Далее нам следует обсудить вопрос о том, можно ли поставить эксперимент, в котором была бы заблокирована (или ослаблена) фазовая синхронизация между нейронными ансамблями, связанными с памятью. И если можно, то приведет ли такая блокировка синхронизации к значительному ухудшению памяти (прежде всего, нарушению способности ассоциативно извлекать из памяти ту или иную информацию)? Подобный эксперимент мог бы послужить весомым аргументом в пользу того, что ассоциативность мышления обеспечивается фазовой синхронизацией, что эта синхронизация является одним из условий реализации мыслительной операции аналогии.

7. Блокировка фазовой синхронизации нейронных ансамблей. Анализ последствий такой блокировки.

Как ни удивительно, эксперименты, связанные с подавлением синхронизации различных, удаленных друг от друга нейронных структур,

весьма многочисленны. Они поставлены самой природой или, другими словами, эти эксперименты природа постоянно «ставит» на людях, достигших пожилого возраста. По мере старения человеческого организма в нервных клетках и тканях накапливаются повреждения, вызванные окислительным стрессом, нарушением функций митохондрий, появлением белков, имеющих неправильную конформацию, накоплением мутаций генов, работающих в нейронах. Это неизбежно должно приводить к нарушению процессов нейронной генерации электрических импульсов, а также ответа нервных центров на эти импульсы.

В 2019 г. ученые из Бостонского университета (США) экспериментально подтвердили тот факт, что у пожилых людей ослабляется синхронизация между элементами мозговой сети (нейронными структурами), что приводит к значительному ухудшению памяти. Возрастной спад уровня синхронной работы удаленных участков мозга негативно сказывается на процессах кодирования (запоминания) и извлечения информации из памяти. Бостонские нейробиологи изучали память сорока двух людей в возрасте от 60 до 76 лет, предлагая им задачи (тесты), требующие участия рабочей (оперативной памяти). ЭЭГ - активность их мозга регистрировалась с помощью электродов, расположенных в области префронтальной коры и височных долей. Оказалось, что синхронизация на частотах тета- и гамма-ритма в этих областях мозга пожилых испытуемых при выполнении задания является более низкой, чем у молодых людей в возрасте 20-25 лет.

Не останавливаясь на констатации этого факта, американские исследователи решили проверить, каким образом изменится рабочая память пожилых людей при использовании такого неинвазивного воздействия на мозг, как транскраниальная стимуляция постоянным током (микротополяризация). Оказалось, что рабочая память пожилых участников эксперимента при использовании активной стимуляции становилась лучше и была сравнима с рабочей памятью молодых людей. Ученые пришли к выводу,

что восстановить потерянные функции памяти можно с помощью стимуляции мозга, которая поддерживает синхронизацию нейронных ансамблей на уровне, характерном для молодого возраста [37].

8. Заключение

Перечислим основные нейробиологические факты, указывающие на то, что нейронным коррелятом мыслительной операции аналогии, а именно той ее стадии, на которой происходит ассоциативное связывание содержательно близких воспоминаний (идей), является фазовая синхронизация удаленных нейронных ансамблей, хранящих эти воспоминания. Во-первых, в разнообразных исследованиях показано, что элементы памяти распределены по всей коре головного мозга. Например, «семантические» нейроны, хранящие слова и их значения, разбросаны по всем участкам (зонам) мозга [7]. Чтобы существовала возможность ассоциативного связывания образов, хранящихся в разных участках, необходим физический механизм такого связывания. Во-вторых, правило обучения Хебба применимо только к близко расположенным нейронам. Это правило не может обеспечить синаптическое усиление удаленных нейронов, поскольку дендриты, соединяющие через синапсы близкие нейроны, – это короткие отростки («герои малых дистанций»). В-третьих, скорость синаптического усиления, а также скорость распространения нейромедиаторов в нервной системе не соответствуют скорости ассоциативной конвергенции сигналов. Подобной скоростью (и необходимым дальнодействием) обладает лишь фазовая синхронизация импульсной активности нервных клеток. Роль синхронной (когерентной) активности групп нейронов в осуществлении психических функций доказана во многих исследованиях.

Примечательно, что некоторые ученые уже близки к тому, чтобы рассматривать ассоциативность мышления (в том числе ассоциативность семантических актов) как результат возникновения динамических связей

между нейронными ансамблями, работающими в режиме синхронизации. В частности, доктор психологических наук Т.Н.Ушакова, используя термин «суммация активности», соответствующий понятию синхронизации, и применяя термин «логоген» для обозначения семантического эквивалента нервной модели стимула (по Е.Н.Соколову), сформулировала гипотезу о том, как человеческая мысль превращается в речевой продукт. Т.Н.Ушакова [38] полагает, что ментальный поиск слов, необходимых для выражения той или иной мысли, включает процесс установления динамических временных связей между нейронными структурами, в которых хранится память об «актах сознания» (семантических операциях) и указанных выше «логогенах». Благодаря динамическим временным связям (которые когда-то активно исследовал М.Н.Ливанов) определенный «логоген» оказывается выделенным из вербально-семантического поля, в результате чего, «мысль найдет, таким образом, возможность соединиться со словом» [38, с.111].

Безусловно, в процессе ментального поиска средств словесного выражения (оформления) мыслей существенную роль должны играть те же механизмы фазовой (и амплитудно-фазовой) синхронизации нейронных ансамблей, которые участвуют в актах ассоциативного связывания воспоминаний, обеспечивающих реализацию мыслительной операции аналогии.

Литература:

1. Новиков Н.Б. 1000 аналогий, изменивших науку. – М.: ИП РАН, 2010. – 878 с.
2. Бехтерева Н.П., Бундзен П.В., Гоголицын Ю.Л. Мозговые коды психической деятельности. – Ленинград: «Наука», 1977. – 165 с.
3. Бехтерева Н.П., Гоголицын Ю.Л., Кропотов Ю.Д., Медведев С.В. Нейрофизиологические механизмы мышления: отражение мыслительной

деятельности в импульсной активности нейронов. – Ленинград: «Наука», 1985. – 272 с.

4. Гоголицын Ю.Л. Кодирование частотой разрядов нейронов в механизмах мыслительной деятельности человека // Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. – Ленинград: 1984. – 346 с.

5. Kay K.N., Naselaris T., Prenger R.J., Gallant J.L. Identifying natural images from human brain activity // Nature. – 2008. – Vol.452. – P.352–355.

6. Nishimoto S., Vu A.T., Naselaris T., Benjamini Y., Yu B., Gallant J.L. Reconstructing visual experiences from brain activity evoked by natural movies // Current Biology. – 2011. - Vol.21 (19). - P.1641-1646.

7. Huth A.G., De Heer W.A., Griffiths T.L., Theunissen F.E., Gallant J.L. Natural speech reveals the semantic maps that tile human cerebral cortex // Nature. – 2016. – Vol.532. – P.453–458.

8. Лурия А.Р. Высшие корковые функции человека. – СПб.: «Питер», 2020. - 768 с.

9. Бехтерева Н.П. Магия мозга и лабиринты жизни. – М.: «АСТ», 2007. – 383 с.

10. Савельев С.В. Происхождение мозга. – М.: «Веди», 2005. – 368 с.

11. Баарс Б., Гейдж Н. Мозг, познание, разум: введение в когнитивные нейронауки. Том 1. – М.: «Бином. Лаборатория знаний», 2014. – 552 с.

12. Дарвин Ч. Воспоминания о развитии моего ума и характера // Дарвин Ч. Сочинения. Том 9. – М.: изд-во АН СССР, 1959. – С.166-242.

13. Пуанкаре А. Наука и метод // Пуанкаре А. О науке. – М.: «Наука», 1983. - С.283-403.

14. Дирак П. Воспоминания о необычайной эпохе. Сборник статей. – М.: «Наука», 1990. – 208 с.

15. Дирак П. Релятивистское волновое уравнение электрона // Успехи физических наук. – 1979. – Том 129. - № 4. – С.681-691.

16. Харгиттай И. Откровенная наука: беседы со знаменитыми химиками. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 472 с.
17. Цинь Дж. Код памяти // В мире науки. – 2007. - № 11. – С.18-25.
18. Wigstrom H., Gustafsson B., Huang Y.Y. Long-term potentiation of synaptic transmission in the hippocampus obeys Hebb's rule for synaptic modification // Cellular mechanisms of conditioning and behavioral plasticity. – New-York: Plenum Press, 1988. - P.47-55.
19. Sutherland G.R., Naughton B.M. Memory trace reactivation in hippocampal and neocortical neuronal ensembles // Current Opinion in Neurobiology. – 2000. - Vol.10. - № 2. - P.180-186.
20. Кандель Э. В поисках памяти. Возникновение новой науки о человеческой психике. – М.: «Астрель», «CORPUS», 2012. – 736 с.
21. Dupret D., O'Neill J., Pleydell-Bouverie B., Csicsvari J. The reorganization and reactivation of hippocampal maps predict spatial memory performance // Nature Neuroscience. – 2010. – Vol.13. – P.995–1002.
22. Abeles M. Role of the cortical neuron: integrator or coincidence detector? // Israel Journal of Medical Sciences. – 1982. - Vol.18 (1). - P.83-92.
23. Иваницкий А.М., Лебедев А.Н. Гармония ритмов мозга. К 100-летию со дня рождения академика М.Н.Ливанова // Вестник РАН. – 2007. – Том 77. - № 9. – С.831-842.
24. Ливанов М.Н. Нейрофизиологический аспект исследований системной организации деятельности головного мозга // Ливанов М.Н. Избранные труды. Пространственно-временная организация потенциалов и системная деятельность головного мозга. – М.: «Наука», 1989. – С.229-248.
25. Gray C.M., Konig P., Engel A.K., Singer W. Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties // Nature. – 1989. - Vol.338 (6213). - P.334-337.

26. Борисюк Г.Н., Борисюк Р.М., Казанович Я.Б. и др. Осцилляторные нейронные сети. Математические результаты и приложения // Математическое моделирование. – 1992. - Том 4. - № 1. - С.3-43.
27. Абарбанель Г.Д., Рабинович М.И., Селверстон А. и др. Синхронизация в нейронных ансамблях // Успехи физических наук. – 1996. - Том 166. - № 4. - С.363-390.
28. Fries P., Roelfsema P.R., Engel A.K., Konig P., Singer W. Synchronization of oscillatory responses in visual cortex correlates with perception in interocular rivalry // PNAS. – 1997. - Vol.94 (23). - P.12699-12704.
29. Fries P., Schroder J.H., Roelfsema P.R., Singer W., Engel A.K. Oscillatory neuronal synchronization in primary visual cortex as a correlate of stimulus selection // Journal of Neuroscience. – 2002. - Vol.22 (9). - P.3739-3754.
30. Fries P. A mechanism for cognitive dynamics: neuronal communication through neuronal coherence // Trends in Cognitive Sciences. – 2005. - Vol.9 (10). - P.474-480.
31. Fell J., Axmacher N. The role of phase synchronization in memory processes // Nature Reviews Neuroscience. – 2011. - Vol.12. - P.105–118.
32. Clouter A., Shapiro K.L., Hanslmayr S. Theta phase synchronization is the glue that binds human associative memory // Current Biology. – 2017. - Vol.27 (20). - P.3143-3148.
33. Vaz A.P., Wittig J.H., Inati S.K., Zaghoul K.A. Replay of cortical spiking sequences during human memory retrieval // Science. – 2020. - Vol.367 (6482). - P.1131-1134.
34. Wutz A., Loonis R., Roy J.E., Donoghue J.A., Miller E.K. Different levels of category abstraction by different dynamics in different prefrontal areas // Neuron. - 2018. - Vol.97. - № 3. - P.716-726.
35. Baldassi C., Alemi-Neissi A., Pagan M., Dicarlo J.J., Zecchina R., Zoccolan D. Shape similarity, better than semantic membership, accounts for the structure of

visual object representations in a population of monkey inferotemporal neurons // PLOS Computational Biology. – 2013. - Vol.9. - № 8.

36. Барышников П.Н. Семантические процессы сознания: от вычислительных моделей к языковому опыту // Эпистемология и философия науки. – 2014. - Том 41. - № 3. - С.96-114.

37. Reinhart R.M.G., Nguyen J.A. Working memory revived in older adults by synchronizing rhythmic brain circuits // Nature Neuroscience. – 2019. - Vol.22. - P.820–827.

38. Ушакова Т.Н. О механизмах вербальных процессов человека // Психология. Журнал Высшей школы экономики. – 2009. – Том 6. - № 1. – С.99-113.