

НЕЙРОБИОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФРАГМЕНТАЦИИ ПАМЯТИ В СООТВЕТСТВИИ С ВЕСОМ ИНФОРМАЦИИ

Лавров В.В., Рудинский А.В.

Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, г. Санкт Петербург, Россия

Впервые представлена модель, отражающая совмещение регулятора и регистратора в едином блоке, осуществляющем запись фрагмента информации в мозговой памяти. Весовые параметры фрагмента определяются его значением для принятия решения в поведенческой ситуации. Чем больше вес фрагмента, тем больше объем памяти отводится для его регистрации и тем легче он считывается. Модель объясняет формирование рабочей памяти, природу ассоциаций и позволяет понять причину быстрого стирания в памяти бесполезной информации. Предполагается, что модель найдет свое применение в построении компьютера, воспроизводящего работу мозга.

NEUROBIONIC MODEL OF FRAGMENTATION OF MEMORY IN ACCORDANCE WITH WEIGHT OF INFORMATION

For the first time it is presented the model which reflect overlapping of a regulator and the registrar in the uniform block, carrying out record of a fragment of the information in brain memory. Weight parameters of a fragment are determined by its value for decision-making in a behavioral situation. The more the weight of a fragment, the more memory size is allocated for its registration and the easier to read it. The model explains formation of working memory, the nature of associations and allows to understand the reason of fast deleting in memory of the useless information. It is supposed, that the model will find the application in construction of the computer reproducing work of a brain.

Проблема памяти является основополагающей в исследовании целостной работы нейронной сети. Прежде всего, имеется в виду вопрос о том, как происходит управление переходом фрагментов зарегистрированной информации из категории эпизодической, кратковременной, долговременной и рабочей памяти в другую. Важно понимать, что никакого перемещения фрагментов памяти по нейронным структурам не происходит. Встречающееся в литературе мнение о «перемещении» памяти следует воспринимать как метафору, поскольку в реальности новая память формируется на основе новой полученной информации. О ключевом значении проблемы памяти говорил еще И.М. Сеченов [1], когда рассматривал перспективу науки в изучении мозга и психики. Сложность проблемы не исчерпывается качеством записи и степенью доступности считывания. Формирование ассоциаций и целостных образов из информационных фрагментов, записанных в разных структурах нейронной сети, должно найти объяснение с помощью одной модели,

применимой для широкого спектра явлений памяти. Причем особого внимания заслуживает принцип гетерогенности нейронной сети, предусматривающий системное распределение функций между элементами нейронных сетей, структурированных по функциональным единицам. Имеется в виду, что нейросетевой модуль, центральным элементом которого выступает интегрирующий нейрон («интеллектуальный» нейрон, для роли которого, например, подходит большой пирамидный), участвует в различных функциональных системах. Каждая из них формируется для выполнения конкретного поведенческого акта [2]. Таким образом, каждый интегрирующий нейрон, обладающий выходом на исполнительные органы и управляющий исполнителями, имеет комплексы фрагментов памяти, значимость которой меняется по мере участия в разных поведенческих актах. Понятно, что в таких условиях необходима целесообразная селекция, поскольку фрагменты информации, важные в одном случае, могут иметь нулевой вес в другом случае, когда выполняется другой акт. Здесь идет речь не о так называемых «энергетических» явлениях, обусловленных переходом от возбужденного к заторможенному состоянию и обратно, а именно о памяти, потому что участие в разных поведенческих актах может происходить в равном функциональном состоянии. Необходимость регуляции веса информационных фрагментов становится очевидной еще и потому, что «пересортировка» памяти сопряжена с постоянным поступлением информации, неизбежно переполняющей ресурсы памяти. То есть, необходимо иметь регулятор стирания памяти и восстановления мощных следов памяти в соответствии с весом информации.

Функция регистратора и регулятора регистрации предполагают наличие, по крайней мере, двух взаимодействующих элементов. Исследования, начатые ранее [3] и продолжающиеся в настоящее время, посвящены проверке предположения о совмещении двух элементов едином блоке, а не в пространственном разделении, как принято думать в настоящее время. Было показано, что в мозге регуляторы и регистраторы совмещены в пространстве. Полученные факты легли в основу впервые высказываемого представления о том, что гетерогенная нейронная структура обеспечивает запись фрагментов информации на основе весовых параметров этих фрагментов. Вес определяется значением фрагмента для принятия решения, когда интегрируются фрагменты разного веса.

Цель данной работы заключалась в моделировании процесса управления памятью в гетерогенной нейронной сети с учетом изменения весовых параметров зарегистрированных фрагментов информации.

На первом этапе обратили внимание не гетерогенность нейронных популяций. Дело в том, что «самостоятельные, самодостаточные», имеющие выход на исполнителя, нейроны не могут существовать без группы тесно связанных с ними сервисных нервных клеток. Поэтому

признано [4-6], что микросистемной функциональной единицей мозга является нейронный модуль, состоящий из популяции неоднородных (дифференцированных по своей функциональной роли) нервных клеток. Примером такого модуля служит большой пирамидный нейрон (БПН) и группа связанных с ним сервисных нейронов, использующих эффекторный выход БПН. Нейроны этой группы опосредуют информацию, поступающую к БПН, и, понижая информационную нагрузку, тем самым оптимизируют работу БПН. БПН обладает следующими свойствами, указывающими на ведущее положение в модуле: имеет наибольшую разветвленность дендритов, ответственных за восприятие информации; апикальный дендрит БПН проходит через весь поперечник коры, что позволяет собирать информацию от нейронов всех слоев; БПН имеет максимальный набор функциональных блоков, в том числе – аксошиповый аппарат и запрещающие синапсы на аксонном холмике.

На следующем этапе работы обратили внимание на принципы целесообразной фрагментации сенсорной информации [7]. Имеется в виду, что нейронная сеть не просто воспринимает потоки информации от рецепторов, а вначале создает запрос на нужную информацию и затем фильтрует входные потоки информации, отбирая и фрагментируя в соответствии с запросом. Результаты работы согласуются с литературными сведениями, касающимися принципов принятия решения при опознании зрительных образов и включения механизмов памяти. Исследователи показали, что запись в памяти зрительных сигналов определяется поведенческой значимостью сигналов, настроенностью на их восприятие и регулируется неспецифическими нервными структурами [8-10].

На основном этапе работы приступили к моделированию процессов управления памятью в соответствии с весом информации, исходя из представления, что объем памяти, отводимой для записи каждого фрагмента, регулируется в соответствии с его весом. Именно здесь проясняется природа совмещения регулятора и регистратора в одном блоке. Чем больше объем памяти, отведенной для фрагмента, тем дольше он способен храниться и тем легче считывается. Объем памяти может сокращаться, при этом считывание затрудняется вплоть до того уровня, когда волевым усилием становится невозможно сознательно воспроизвести информацию. Наступает момент забывания, информация попадает в разряд подпороговой, но при этом полностью не уничтожается. Восстановление и увеличение объема фрагментов, происходит при повторении событий. Экстренное воспроизведение подпороговых информационных фрагментов, занимающих мало места в памяти и имеющих малый вес, обеспечивается напряжением регулятора. Развитие такого напряжения связано с состоянием, которое определяется как «стресс».

Далее открылась перспектива перехода к алгоритмическому выражению модели памяти с учетом сформулированных выше положений. Поскольку память динамична, она рассматривается в процессе принятия решения, когда происходит консолидация актуализированных фрагментов памяти. Представим принятие решения как процесс объединения наличного количества фрагментов.

$$Az_n = \bigcup_0^{\infty} \text{inf}_n, \quad (1)$$

где пределы у символа объединения относятся к индексу фрагмента (inf) – n. Примем в качестве одного из условий свойство постоянства фрагмента во времени и рассмотрим величину Az_n как абсолютно правильное решение. Тогда текущий уровень обработки данных можно представить как:

$$Tz_n(t) = \bigcup_{n=1}^N w_n(t) \text{inf}_n, \quad (2)$$

где $w_n(t)$ - вес фрагмента с номером n на данный момент времени. Имеется в виду, что вес фрагмента представляет собой результирующую оценку его значимости для принятия правильного решения.

Отметим, что $0 \leq w_n(t) \leq 1$, причем значение $w_n(t) = 0$ свидетельствует о том, что в момент времени t нет данных о значимости фрагмента inf_n . Как только будут получены данные для этого inf_n , его вес станет $w_n(t) \neq 0$.

Формула (2) отражает тот факт, что весовые коэффициенты обусловлены оценкой, производимой с учетом значимости для принятия решения. Очевидно, что в процессе принятия решения доступная информация не просто фильтруется – производится целенаправленный поиск информации, а также ее взвешивание и отбор. Чем больше значимость, тем более она детализируется, тем больше ее вес и тем больше места отводится в памяти для записи.

Итак, подчеркивается тот факт, что базисным моментом в процессе принятия решения служит оценка весов фрагментов информации и установление корреляционных отношений с предыдущими оценками, которые находятся в памяти. Соответственно, принятие решения можно представить, как дискретный временной процесс весовой оценки фрагментов (с номером – i), характеризующих состояние объекта (с номером – j) в виде следующей записи:

$$O_{ij}(t_k) = \bigcup_{n(1)}^{N(i)} w_{n(i)}^j(t_k) \text{inf}_{n(i)}^j \quad (3)$$

Формула (3) отражает тот факт, что в ходе принятия решения взвешенно отбираются фрагменты, которые свидетельствуют о ситуации.

После того, как решение принято и выполнено, наступает момент, когда актуальность и вес информации могут резко изменяться, вплоть до приближения к нулевой величине, поскольку выполнение решения сопровождается обновлением ситуации. Понятно, что не экономно сохранять в памяти прежние весовые значения и выделять большой объем памяти для поддержания на высоком уровне информации, потерявшей актуальность. Как обеспечивается динамика памяти из разряда актуальной в неактуальную и обратно в соответствии с требованиями ситуации? Исследователи редко касаются этого вопроса. Предполагается, что память просто стирается под влиянием времени, и не предусматривается целесообразное управление памятью. Проблема управления памятью заслуживает пристального изучения, поскольку она важна как для понимания работы мнестических механизмов, так и для выяснения принципов принятия решения в условиях дефицита наличной полезной информации. В этих условиях успех определяется правильной переоценкой веса доступной информации.

Здесь обсуждение обращается к рассмотрению дифференцированного сдвига весовых параметров вследствие изменения состояния ситуации, в которой принимается решение. При завершении процесса принятия решения в момент времени t_k складывается набор фрагментов с индивидуальными весовыми характеристиками, после чего запускается процесс обновления памяти. Происходит «забывание» и освобождение места в памяти. Процесс забывания (уменьшения веса и размеров фрагментов, хранящихся в памяти) может протекать пассивно вследствие изменения структур памяти под влиянием времени, или активно под контролем регулятора.

В соответствии с первым правилом Иоста (цитировано по [14]) и формулой (3) определим процесс забывания информации как:

$$O_{ij}(t_k) = \prod_{n(1)}^{N(i)} \exp(-a_{n(i)}^j t) (w_{n(i)}^j(t_{k-1}) \inf_{n(i)}^j) \quad (4)$$

где: t - время забывания; $a_{n(i)}^j$ - постоянная дисконтирования.

Перед началом забывания (момент времени $t=0$) завершается процесс консолидации информации. Из формулы (4) следует, что информация, находясь в памяти, может изменяться, но не исчезает, поскольку экспоненциальная функция не достигает нулевого значения. Соответственно, процесс забывания, сопровождающийся постепенным уменьшением объема и весов фрагментов, хранящихся в памяти, выражается в уменьшении суммарной оценки веса объекта в памяти. Вследствие такого уменьшения память переходит в подпороговую область. Такой переход не означает, что фрагмент памяти осуществляет «дрейф» по структурам, служащим субстратом памяти. Переход из одной категории памяти в

другую обусловлен изменением состояния фрагмента. По всей видимости, порог забывания определяется потерей надежного контроля за извлечением информации из памяти. В некоторых экстренных поведенческих ситуациях информация из подпороговой памяти может стать высоко актуальной. Считывание такой информации в мозге обеспечивается интуицией, когда в состоянии стресса мобилизуется ресурс регуляторных систем мозга. По всей видимости, эволюция целесообразно формировала механизм памяти, с одной стороны, следуя принципу экономии, допускала «забывание», а с другой – сохраняла полезную информацию в подпороговой области. Отмеченные особенности работы памяти в мозге служат ориентиром для будущей конструкции такого запоминающего устройства, которое будет воспроизводить принципы принятия решения мозгом. Все виды памяти используют эволюционно отработанные способы записи, причем в качестве стабилизированного «языка» записи служит генетическая символика. Важно отметить еще один момент, обучение и накопление памяти никогда не начинается с «чистого листа», а представляет собой дополнение к той, которая задается наследственно. Именно наследственная информация составляет основную программу поведения живого организма и предоставляет базисную символику памяти. Если ранее не было достоверных данных о возможности изменения наследственной памяти в течение жизнедеятельности, то в настоящее время все больше наблюдений свидетельствуют о том, что возможен переход жизненного опыта в наследуемую память при условии, что этот опыт определяет выживание не отдельной особи, а всего вида. Для объяснения такого явления недостаточно весовой модели и представлений о разных методах записи информации в нейронах – следует иметь в виду иерархию регуляторов в активационно-эмоциональном комплексе мозга [3].

Весовые принципы, определяющие прочность информации в памяти, пригодны для объяснения доступности этой информации для воспроизведения. Наиболее доступная и часто используемая информация относится к разряду рабочей (оперативной). Предположение, что в мозге, подобно ЭВМ, имеется специализированная макроструктура такой памяти, не было подтверждено нейрофизиологическими исследованиями. Поэтому следует полагать, что формирование рабочей памяти обеспечивается не особой структурой мозга, а облегчением доступа к памяти. Такое облегчение, по всей видимости, обусловлено тем, что обладающие высоким весом фрагменты рабочей памяти занимают больше места в памяти, чем фрагменты, менее востребованные и менее значимые для принятия решения. Благодаря весовым параметрам, можно выделить ряд уровней состояния памяти. Первый уровень – рабочая (оперативная) память, воспроизводится без усилий регулятора, фрагменты имеют высокий вес и увеличенные размеры со средней весовой величиной – h_{nm} . Второй уровень памяти, воспроизводится под контролем регулятора без напряжения, фрагменты

имеют средние весовые параметры – h_{mp} . Третий уровень памяти, фрагменты со средним весом – h_{pa} , считывание («воспоминание») достигается после напряжения регулятора, требуется время для обнаружения требуемого фрагмента памяти и воспроизведения.

Рассматривая модель памяти, невозможно обойти проблему консолидации фрагментов, зафиксированных в пространственно-временном континууме мозга. Такая консолидация и создание целостного образа, по-видимому, обусловлена наличием функциональных контактов (ассоциативностью) фрагментов. Понятно, что ассоциативность обеспечивается связями между структурами, содержащими запись информации. Но связи являются субстратом и не дают представления об организации процессов консолидации. Коммутационная концепция, объясняющая обучение и возникновение ассоциаций только за счет формирования (или трансформации) контактов между нейронными структурами, уступает место теории, основанной на системно-информационном подходе. Поскольку один и тот же фрагмент памяти может входить в состав разных образов, то такой фрагмент, с одной стороны, функционально связан с этими образами, а с другой стороны, устанавливает ассоциацию образов, в состав которых входит. Можно полагать, что чем выше вес такого фрагмента, общего для образов, тем прочнее ассоциация образов. Соответственно, субстратом ассоциативной памяти служит не просто комплекс контактов нейронов, а система тех фрагментов, которые входят в состав ряда образов. Ассоциативные области мозга, как и специфические анализаторные, насыщены неспецифическими регуляторными элементами, что указывает на их важную роль в процессах консолидации фрагментированной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования предложена принципиально новая модель функциональной организации системы памяти, фиксирующей фрагменты информации в соответствии с их весовыми параметрами. Модель, учитывающая дискретность информации и ее избирательность, объясняет, почему необходимо совмещение регистраторов фрагментов и регуляторов в едином блоке. Нейробионическая модель, призванная стать ориентиром для создания памяти, воспроизводящей работу реальных нервных сетей, раскрывает природу следующих особенностей мозговой памяти:

1. Долговременность и прочность памяти обеспечивается увеличением объема фрагментов памяти в тех структурах, которые ответственны за мнестическую функцию.
2. Оперативность рабочей памяти обусловлена легким доступом к тем фрагментам, которые отличаются высоким весом и увеличенными размерами фрагментов памяти.
3. Консолидация фрагментов памяти в процессе принятия решения происходит под контролем регуляторов, которые ответственны за целостность взаимодействия. Ассоциации

образов обусловлены общностью фрагментов памяти, составляющих комплекс этих образов в памяти.

4. Эпизодическая память, как предполагается, формируется информацией, которая селективируется не по отдельным фрагментам, а по комплексам информационных потоков. Особенность эпизодической памяти заключается в том, что она обеспечивает информацией аппарат мозга, ответственный за передвижение в пространстве и за построение триединой модели (модели внешнего мира, собственного тела и модели пространственного взаимодействия двух предыдущих), для чего используются полномасштабные мультимодальные потоки информации.

Список литературы

1. *Сеченов И.М.* Элементы мысли // Избр. произв. М.: Изд-во АН СССР. 1956. Т. 1. С. 272-426.
2. *Анохин П.К.* Очерки по физиологии функциональных систем.– М.: Медицина. 1985. 444 с.
3. *Лавров В.В.* Мозг и психика. СПб. 1996, 156 с.
4. *Лавров В.В., Рудинский А.В.* Организация целостной деятельности микро- и макросистемных нервных образований и гетерогенные нервные сети// В сб.: «Нейроинформатика-2003». Т.1, Москва. 2003. С.19-23.
5. *В.Б. Вальцев, В.В. Лавров, А.В. Рудинский* Модель отношений неоднородных нейронов в процессе адаптации нейросетей к изменению ситуации // "Нейрокомпьютеры и их применение", VII Всероссийская научно-техническая конференция, ИПУ, Москва, 2002 г., ISBN5-201-14-935-9.
6. *Ермоленко А.С., Рудинский А.В., Сиек Ю.Л.* О применении гетерогенных нейронных сетей при построении классификаторов морских объектов// В сб.: "Нейроинформатика и ее приложения". Красноярск: . 2002 г. С. 23-25.
7. *Лавров В.В., Вальцев В.Б.* Целесообразное фрагментирование информации на входе в мозг//Информационные технологии. 2006, № 2. С. 22-29.
8. *Iba M., Sawaguchi T.* Neuronal activity representing visuospatial mnemonic processes associated with target selection in the monkey dorsolateral prefrontal cortex// Neuroscience Research, 2002, V 43, N1. P. 9 – 22
9. *Brewer J. B., Zhao Z.* Making memories: Brain activity that predicts how well visual experience will be remembered// Science, 1998, V 281, N 5380, P. 1185-1187.
10. *Hoffman K.L., McNaughton B.L.* Sleep on it: cortical reorganization after-the-fact// Trends in Neurosci., 2002, V 251. P. 1-2.