

---

---

## Section 1. Cognitive Modelling

---

---

### 1.1. Conceptual Modelling of Thinking as Knowledge Processing during the Recognition and Solving the Problems

#### КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБ ОПОЗНАНИИ ОБРАЗОВ И РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ В ПАМЯТИ ЧЕЛОВЕКА И ВОЗМОЖНОСТЯХ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ

**З.Л. Рабинович**

***Аннотация:** Данное кибернетическое представление выработано на основании сведений из нейрофизиологии, нейропсихологии, нейрокибернетики, а также правдоподобных гипотез автора, восполняющих их недостаток. Прежде всего, уделено внимание общим принципам организации памяти в мозге и происходящим в ней процессам, реализующие такие психические функции как восприятие и идентификация входной образной информации и как решение проблем, задаваемой исходной и целевой ситуацией. Реализация второй функции, собственно мыслительной, рассматривается в аспектах образного и языкового мышления на уровнях интуиции и осознания. Высказываются соображения о целесообразности и принципах бионического подхода в создании соответствующих средств искусственного интеллекта.*

***Ключевые слова:** образ, восприятие, опознание, решение, генератор проблем, осознание, интуиция.*

---

#### **Введение**

---

Концептуальный уровень моделирования естественных механизмов психики означает проникновение в них сверху вниз – от определенных психических функций к информационным принципам их физической реализации, т.е. от психического результата к информационному механизму его получения [1-4].

Таким образом, концептуальная модель устанавливает (выражаясь терминологией топ-тематики) "the understanding of the relationships between structure and function in biology".

Информационные процессы, происходящие в их физической субстанции – нервной системе, разделены на два главных класса – процессы чисто-комбинационные (как не связанные с запоминанием), происходящие в органах чувств, управления движением и т.д. и процессы комбинационно-накапливающие, происходящие в самой памяти.

В соответствии с предметом доклада в качестве исходного постулата примем, что к этим процессам относятся процессы мышления (включая обработку входной в память и исходной из нее информации), т.е. память является одновременно и средой мышления, погруженной в общую нейронную сеть всей нервной системы.

Где же граница памяти, и какова ее организация?

Ниже мы рассмотрим концептуальную модель памяти и процессов в ней, ориентируясь на функцию опознания, относящуюся к самому понятию памяти и функцию решения проблем, относящуюся уже к целенаправленному мышлению как особо важную в жизнедеятельности человека. Данные функции

являются доминирующими в задачах искусственного интеллекта, и в этом плане концептуальная модель (далее КМ) представляет интерес также в проблематике “обратной – From Nature to Artificial”).

### КМ – память и опознание

В функцию памяти входят такие понятия, как “узнать”, “вспомнить”, “вообразить” и т.д. Осуществление всех этих действий, в отличие от восприятия информации из внешней по отношению к памяти среде, удобно представлять как проявление так называемого умственного взора”, т.е. взора, инициируемого изнутри самой памяти и проявляющегося в виде возбуждения определенных смысловых запомненных структур в сети памяти, их сочетаний, комбинаций и т.д.

Так что же это за структура?

Чтобы ответить на данный вопрос и дать тем самым ключ к пониманию глобального определяющего принципа организации памяти (что и требуется от концептуальной модели), оказывается необходимым отправляться от исходной гипотетической предпосылки, вытекающей как бы из “здорового смысла” (не согласующееся с опытными данными, из которых, однако, она непосредственно не следует ввиду неосуществимости достаточно полной и детальной наблюдаемости).

И такой предпосылкой, как исходной главной гипотезой, является следующая:

“Воспроизведение образа в памяти (воображение, “умственный взор”) определяется возбуждением всех ее элементарных компонент, которые участвовали в восприятии образа”.

Это может считаться законом природы, как непреложным, но необъяснимым фактом. Действительно, как получается, что колебания потенциала компонент нейронной сети превращаются в как бы видимые изнутри (тоже слышимые, осязаемые и т.д.) образы? А ведь получается! Значит, от этого явления и нужно отправляться (как танцевать от печки) в дальнейших построениях.

Эти построения должны уже привести к возможности образования сигналов *изнутри* памяти, которые бы возбуждали компоненты воспринятого и зафиксированного в памяти образа, информация о котором на входе в память уже отсутствует. По отношению к этой первичной информации возбуждающие сигналы изнутри уже представляют поток информации обратной, образуемой в самой памяти.

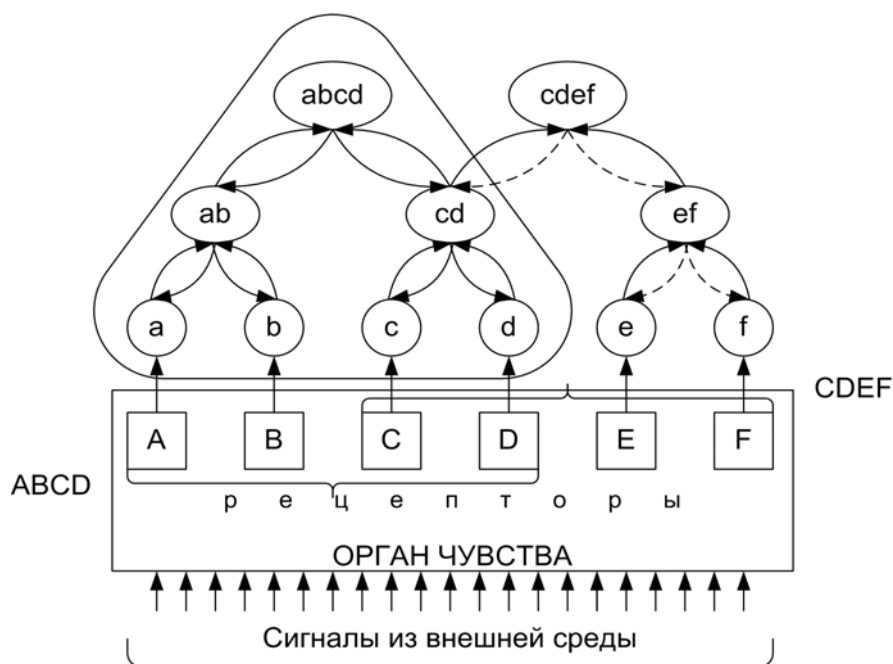


Рис. 1. Элементарные структуры восприятия образа, запоминания и распознавания.

Сказанное иллюстрируется рис.1, где память представлена ее главными полями (см. далее), а разграничение прямой и обратной информации обозначено стрелками. Таким образом, приходим

к непреклонному выводу, что *“память”* собственно начинается там, где кончаются обратные связи. А кончаются они именно на слое концепторов “с”, повторяющих рецепторы “r”. На рецепторы “r” обратные связи не должны распространяться, поскольку при “умственному взоре” возникали бы иллюзии, т.е. видимость (слышимость, осязаемость и т.д.) того, что на органы чувств в настоящий момент времени не поступает. Таким образом, *граница памяти как раз и проходит между рецепторами “r” и концепторами “с”*, для чего, собственно, и нужно дублирование первых последними.

Эти последние – концепторы “с”, уже являются по сути мельчайшими смысловыми компонентами воспринимаемых образов и применительно к Образу его самыми элементарными подобразами. Эти подобразы естественным путем иерархически группируются в более крупные подобразы, те, в свою очередь, в еще более крупные и т.д. вплоть до смысловой концентрации всего Образа в одной структурной единице, означающей, собственно, лишь его символ. Таким путем, при поступлении на вход памяти сформированных информационных сигналов из внешней по отношению к ней среде, формируется в памяти нелинейная парамодальная модель выраженного этой информацией образа. Но для его запоминания, т.е. для возможности воспроизведения образа “умственным взором”, согласно приведенной главной гипотезе, необходимы уже нисходящие обратные связи от верхушки образной пирамиды вплоть до ее основания (состоящую из концепторов, повторяющих входные рецепторы). Следовательно, модель конкретного образа, как объекта или структуры в памяти, представляет собой пирамидальное иерархическое построение с восходящими конвергентными индуктивными (от частных к общему) и нисходящими дивергентными дедуктивными (от общего к частному) связями.

Из множества таких моделей как петель памяти, ассоциативно связывающих между собой наличием в них общих компонент и состоит память в целом, представляющая собой структурную реализацию семантической сети как системы зафиксированных в ней знаний.

Изложенное выше, можно проиллюстрировать предельно простой для наглядности сетью (рис. 1), стоящей из построенного полностью, т.е. запечатленного в памяти образа *ABCD* и введенного в память, но незафиксированного еще в ней образа *CDEF*.

Это обуславливается тем, что пирамида (т.е. модель) образа *ABCD* уже снабжена обратными связями, а пирамида образа *CDEF* еще в полной мере не достроена.

Эти образы имеют один общий подобраз *CD*, являющийся ассоциативным элементом обоих образов. Такое использование общих частей образов обеспечивает, во-первых, экономичность построения семантических структур в памяти, а во-вторых, спонтанную (в смысле самовозникающую) параллельность в обработке образной информации в ней, что, конечно, существенно благоприятствует эффективности обработки (см. далее).

Достройка структуры образа *CDEF* означает формирование обратных связей в нем (показанных пунктиром). Эта достройка, т.е. превращение модели показанного образа в запомненную, может производиться путем ряда последовательных показов этого же образа, что приводит уже к проторению генетически заложенных обратных связей либо даже к их появлению.

Собственно образование структур образов в памяти (моделей) является научно установленным фактом. Но все же, приведенное изложение построения этих структур нуждается в следующей правдоподобной гипотезе, заключающейся в том, что формирование прямых входящих связей для восприятия памятью конкретных образов предшествует возникновению уже путем обучения обратных нисходящих связей, обеспечивающих их запоминание (см. главную гипотезу).

Таким образом, при рождении человека (и других существ, обладающих соответственно развитой нервной системой) среда памяти мозга уже насыщена связями, необходимыми для приема информации от органов чувств, а вот, собственно, возникновение самой памяти в полной мере осуществляется образованием уже обратных связей в процессе жизнедеятельности, начиная от рождения (и в порядке подготовки соответствующих возможностей еще до него). Следовательно, мозг, как механизм мышления, творит сам себя, но под влиянием среды. И несколько отвлекаясь, от предмета изложения интересно заметить, что, по-видимому, так называемые врожденные способности обуславливаются своеобразием генетически заложенных прямых связей, но проявление этих способностей (в смысле образования в памяти соответствующих полных структур образов) уже происходит в результате обучения. Т.е. феноменальные таланты проявляются вследствие совпадения двух факторов – генетически

образованных подходящих структур в Среде памяти и последующего обучения ее в смысле воздействия внешних факторов.

Итак, память мозга в ее концептуальном представлении является иерархической семантической сетью ограниченной сверху окончанием восходящих (прямых – в смысле идущих от органов чувств) и снизу – окончанием обратных связей к структурным единицам непосредственно воспринимающим входную в память рецепторную информацию (сформированную специфическими органами чувств из соответствующих сигналов). И все мышление от простого опознания образной информации вплоть до ее анализа и синтеза и далее производимых действий над множествами образов, связанных с образованием и преобразованием различных ситуаций и т.д., все это осуществляется в указанном замкнутом ограниченном пространстве, связанном *двухсторонними* информационными связями с внешней по отношению к нему средой. Одна связь - для получения информации из среды, вторая – для выдачи информации, управляющей, осведомляющей или другой, образованной в самой памяти. И здесь – в консорциуме “память – внешняя среда”, прослеживаются петли (так называемые “рефлекторные”), которые отличаются, в принципе, от “петлей памяти” тем, что в них прямыми связями будут уже те, которые передают управляющее воздействие к исполнительным механизмам (например, двигательным). Обратными же связями, как в “петлях памяти” будут отрицательные, констатирующие исполнение.

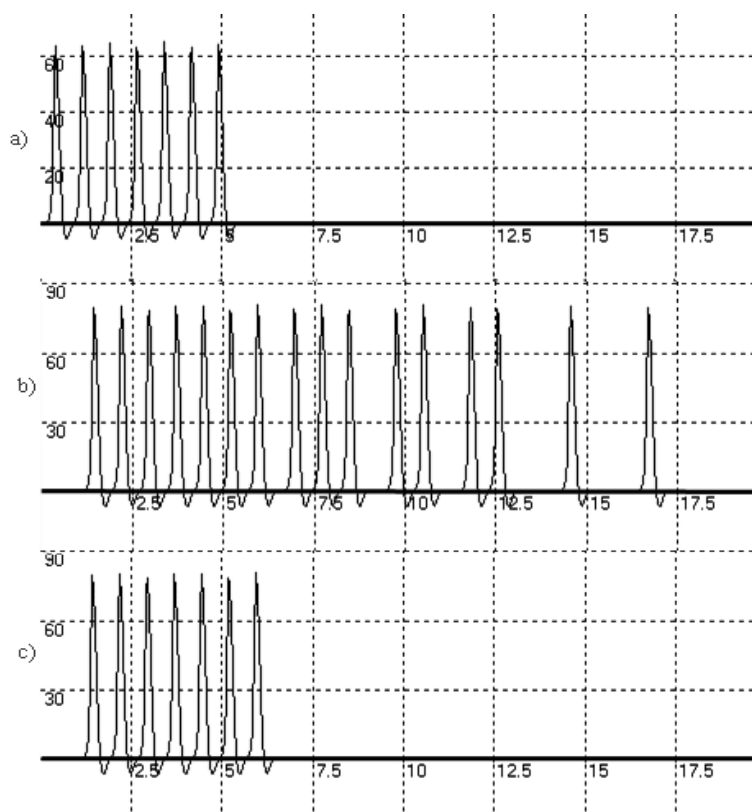


Рис. 2. Результат работы модели в процессе распознавания образа;  
 а) Входы памяти на элементарные концепторы (выходы рецепторов);  
 б) Выходы с элементарных концепторов нижнего уровня с учетом обратных связей;  
 в) Выходы с элементарных концепторов нижнего уровня с разорванными обратными связями.

Теперь об опознании, как простейшей психической функции, которая заключается в установлении наличия модели опознаваемого образа в памяти в виде определенной ее структуры.

Если такая структура есть (как, например, модель *abcd* на рис. 1), то после предъявления ее прототипа и его отключения возникнет повторный всплеск (!) возбуждения этой структуры, уже передаваемого по обратным связям, что и будет означать осуществление “умственного взора”, т.е. опознание предъявляемого образа (согласно главной гипотезе). Если же полностью обратных связей нет, т.е. образ не запомнен, (как, например, *cdef* на рис. 1), то этого повторного всплеска не будет.

Таким образом, гипотетически утверждается, что опознание предъявляемого образа определяется повторным всплеском возбуждения соответствующей структуры, как его воспоминанием.

Эта гипотеза нашла подкрепление в моделировании компонент обонятельной луковицы (предъявленных нейрофизиологом Г.С. Воронковым (МГУ, Россия)), результаты которого представлены на рис. 2 (повторный всплеск отсутствует, если имеющие место обратные связи в обонятельной луковице прерваны, и явно имеет место, если они есть, т.е. есть полная модель предъявленного образа в памяти).

Поскольку процессы возбуждения могут быть как вероятностные, так и возможностные, то конечно, при опознавании возможны не полностью определенные результаты и ложные срабатывания (например, из-за ассоциативных связей (*cdef*) между моделями двух образов. Но это и имеет место в действительности.

В представленной интерпретации “опознание” являлось функцией, исполняемой совершенно автоматически в любых организмах, обладающих соответствующей нервной системой.

В широком же понимании этого термина, как охватывающего еще и “осмысление”, данное осуществление этой функции уже должно относиться к процессу мышления, в котором изложенные действия осуществляются лишь, как первый его этап. При разработке математических моделей образов в памяти может быть эффективно использован аппарат растущих пирамидальных сетей [5] как тип семантических сетей.

---

### **КМ – память и целенаправленное мышление**

---

Введенное понятие структур образов в памяти, как их моделей, остается общим для всех функций мышления – поскольку является основой для организации всей памяти.

Но для моделирования процессов, именно, человеческого мышления особенно важно рассматривать память, как цельную систему, состоящую из подсистем: сенсорной, языковой [2] и высшей ассоциативной подсистемы, где хранятся образы и их языковые обозначения и понятия. Структуры этих подсистем связываются между собой прямыми и обратными связями, определяющими соответствие между ними и их взаимовлияние через передачу возбуждений. Заметим, что многоязычие реализуется дополнительными языковыми подсистемами, структуры которых могут и не иметь непосредственных связей со структурами сенсорной системы, а взаимодействовать с ней лишь посредством структур подсистемы одного языка.

Вид связей между сенсорной и той или иной языковой подсистемой, именно, и определяет возможность и уровень осознаваемого мышления на том или ином языке.

Процесс человеческого мышления (в ранее указанной трактовке этого термина) определяется взаимодействием сенсорной и языковой подсистем Среды на осознаваемом и интуитивном (в понимании – неосознаваемом) уровнях.

Осознаваемое мышление характеризуется тем, что оно органически связано с языковым выражением мыслей, т.е. индивидуум как бы разговаривает сам с собой (поэтому осознаваемое мышление и называется вербальным, хотя, в принципе, язык может быть и не речевой. В первом, доминирующем случае, например, на органы речи даже поступают соответствующие импульсы).

Отсюда и возникает принципиально последовательный характер осознаваемого мышления (поскольку одновременно больше одной мысли невозможно).

В общем же, осознаваемые мысли представляются так называемыми “полными” динамическими структурами, которые объединяют соответствующие возбужденные структуры сенсорной и языковой подсистем на различных уровнях их иерархии.

Возбуждение же полных структур относится к неосознаваемому мышлению, не ограниченному строгим взаимодействием структур сенсорной и языковой подсистем.

Поэтому такие динамические структуры могут возникать одновременно на различных уровнях этих подсистем, не приводя к “произносимости” возбуждаемых смыслов.

Таким образом, количество перерабатываемой информации (пусть хоть и спонтанной) здесь может быть во много раз больше, чем при осознаваемом мышлении.

Более того, на интуитивном уровне мышления могут возникать и такие комбинации, которые не имеют языковых эквивалентов, и поэтому не выходят на уровень сознания (пример – мышление дикарей).

Таким образом, и в целенаправленном процессе решения проблем наряду с осознаваемой его компонентой имеет весьма существенное значение и компонента неосознаваемого интуитивного мышления (человек думает!).

В свете изложенного, вполне естественной представляется следующая гипотеза [1]:

Решаемая Проблема задается в памяти моделями исходной и целевой ситуациями), и ее решением является активизированная цепь причинно-следственных связей, приводящих к преобразованию первой во вторую. Причем, сам процесс образования этой цепи состоит из двух одновременно действующих и взаимосвязанных процессов – последовательно осознаваемого (типа рассуждений) и спонтанной активизации структур в памяти по ассоциативным связям их с моделями исходной и целевой ситуаций. (В дальнейшем изложении термин “модель” будем опускать, терминологически отождествляя этим структуры в памяти с самой ситуацией).

Поскольку воплощение решаемой проблемы (Проблемной ситуации) в памяти создает в ней как бы какое-то напряжение, то весьма наглядным оказывается для иллюстрации и рассмотрения указанного в гипотезе процесса введения специального термина “генератор проблемы” (ГП) [1], полюсами которого являются исходная и целевая ситуации, и напряжение которого поддерживает существование Проблемной ситуации.

Образование же активизированной цепи, замыкающей эти полюсы, означающей решение Проблем, это “напряжение” ликвидирует, т.е. прекращает существование ГП, Звенья указанной цепи, по сути, представляют собой промежуточные ситуации между исходной и целевой (рис. 3) и могут находиться путем не только одностороннего, но и встречного преобразования этих ситуаций.

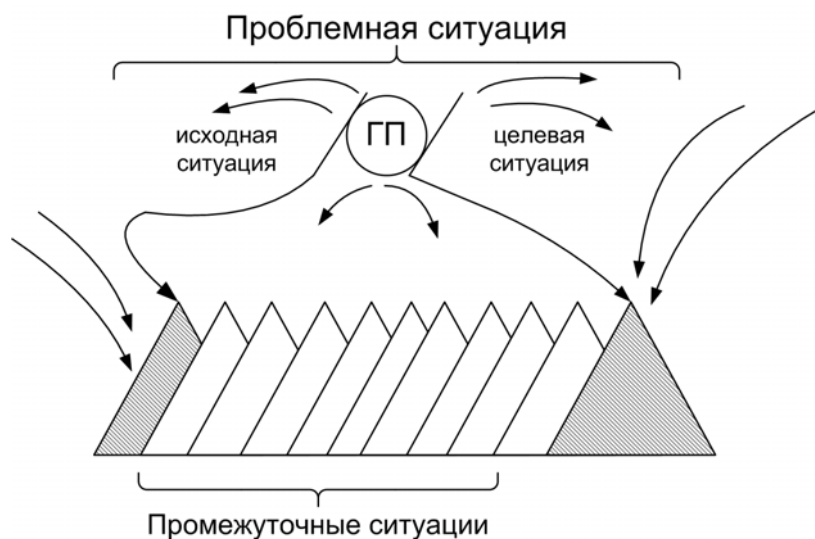


Рис. 3. Цепь решения проблемы как преобразование образных ситуаций

Однако цепь замыкания может и не образоваться в сплошном неразрывном процессе (например, при недостатке знаний в памяти), что, в свою очередь, способствует образованию нового промежуточного ГП, определяющего разрыв в получаемой цепи замыкания его полюсов, т.е. новой пары исходной и целевой ситуаций.

Решение Проблемы может привести к образованию новой структуры (т.е. нового знания) в памяти за счет проторения новых связей между ее компонентами, при достаточной интенсивности и времени существования динамической структуры. Такой процесс аналогичен переходу динамически хранимой информации (т.е. в виде кратковременного запоминания) в статически закрепленную в памяти.

По мере сокращения “расстояния” между исходной и целевой ситуациями за счет образования звеньев искомой цепи их замыкания, возрастание активности второго процесса и общий процесс могут приобрести

лавинообразный характер внезапного замыкания полюсов ГП, т.е. решение Проблемы, как результата озарения. Причем, оно может наступать совершенно неожиданно и случайно, а, именно, в результате лишь второго процесса, когда первый, представляя собой осознаваемые рассуждения, отсутствует, а второй все же происходит, поскольку ГП все же возбужден.

Явление озарения особо характерно для творческих процессов, которые схематично можно рассматривать как последовательности шагов с поочередным превалированием в них в роли осознаваемого и интуитивного мышления [6].

В первом случае осмысливается достигнутый результат и выдвигается новая промежуточная цель (подцель), во втором, т.е. на следующем шаге, эта подцель уже достигается и, возможно, изменяется, и так до достижения конечного результата. Таким образом, весь процесс решения проблемы имеет вероятностный (или возможностный) характер с широким диапазоном своих количественных показателей. Так, скорость и время его прохождения соответственно зависят от степени возбуждения ГП и от сложности решаемой Проблемы. Первый фактор определяется тем, насколько эта проблема занимает человека, второй – длиной цепи “взаимосвязанных структур, соединяющих исходную и целевую ситуации” (т.е. “расстоянием” между ними).

В целом же, приведенная концептуальная модель объясняет множество психологических феноменов, свойственных процессам мышления, и высвечивает материальную субстанцию его механизмов, в том числе способностей человека, его эрудицию, сообразительность, вдохновение и т.п.

---

## О бионическом использовании КМ

---

КМ, построенная с использованием идеи “From Artificial to Natural”, помимо познавательного значения, имеет и существенное бионическое значение согласно обратной идее “From Natural to Artificial”.

Но далеко не все то, что есть в природе, нужно переносить в технику (пример: ноги и колеса). Так, например, внедряя в архитектуру ЭВМ аналоги свойств КМ, нужно иметь в виду, прежде всего, ее назначение.

Для развития универсальных высокопроизводительных и высокоинтеллектуальных ЭВМ (т.е. обладающих соответственно развитым внутренним интеллектом [8]) оказывается весьма целесообразным отражения в их архитектурах следующих свойств (как некоторых аналогов главных принципов КМ):

- Распределенные обработка и оперативное хранение информации (т.е. обрабатывающая часть машины должна представлять собой некоторую памятнопроцессорную среду).
- Двухкомпонентный вычислительный процесс в машине: последовательный, который воспринимает задания пользователей, иницирует, организует и контролирует процесс их выполнения, и параллельный, являющийся компонентом общего вычислительного процесса и ведает выполнением заданий в каждой своей ветви.
- Возможность пошаговой организации общего вычислительного процесса с его динамическим планированием и контролем результатов, получаемых на каждом шаге.
- Представление знаний в машине в виде семантических ассоциативных сетей, реализуемых графами, и их иерархическая обработка, на верхнем входном уровне которой знания представлены сложными структурами данных, а нижнем, соответственно, в детализированном виде.

Универсальная ЭВМ с архитектурой, построенной с использованием указанных принципов, должна способствовать эффективной реализации различных информационных технологий альтернативных классов – символизма и коннекционизма, в том числе и нейрокомпьютеры. Но во втором случае технологии реализуются на программных сетевых моделях, которые при этом могут обладать весьма высокими характеристиками (например, очень большим числом нейроподобных элементов) и частично структурно реализовываться через распараллеливание процессов обработки на памятнопроцессорной среде. Более того, такая ЭВМ должна способствовать эффективной реализации и комбинированию технологии, где пошагово чередовались бы процессы различных технологий, в том числе логической обработки и обучения (например, реализующих последовательности “рациональных” и “интуитивных” выводов [6,7]).

В Институте кибернетики имени академика В.М. Глушкова НАН Украины разработан (с участием первого автора) новый класс мультимикропроцессорных кластерных ЭВМ, обладающих указанными свойствами – так называемые интеллектуальные решающие машины (ИРМ) и, в частности, его модели для массового пользования. Работа была поддержана грантом США, Руководитель Проекта – профессор В.Н. Коваль.

В соответствии с этим, ИРМ сочетают распределенную обработку информации с внутренним языком высокого уровня (обладающим развитыми средствами представления и обработки знаний) и динамическим централизованно-децентрализованным управлением (соответственно последовательным и параллельным).

Именно такая совокупность признаков и обуславливает принадлежность машин ИРМ к новому классу. Интересно, что к принципам построения ИРМ авторы пришли, в основном, из чисто кибернетических позиций машинного интеллекта. И существенная аналогия этих принципов с представлением о механизмах мышления, выраженным в концептуальной модели, подтверждает, что, во-первых, природа весьма рациональна и, во-вторых, что намеченный путь развития машинного интеллекта целесообразен и перспективен.

Данная работа находится в русле исследований, в свое время инициированных, возглавляемых и прогнозируемых В.М. Глушковым, направленных на совместное повышение как производительности, так и внутреннего интеллекта ЭВМ, обеспечивающего высокоэффективное человеко-машинное взаимодействие. В этом направлении выполнен ряд фундаментальных проектов, опыт которых учтен в разработке ИРМ, причем, главным образом, макроконвейерного вычислительного комплекса, архитектуру которого В.М. Глушков называл мозгоподобной.

---

## Литература

---

- [1] Рабинович З.Л. Некоторый бионический подход к структурному моделированию целенаправленного мышления // Кибернетика. – 1979. – № 2. – С. 115-118.
- [2] Воронков Г.С., Рабинович З.Л. Сенсорная и языковая система – две формы представления знаний // Новости искусственного интеллекта. – 1993. – № 2. – С. 116-124.
- [3] Рабинович З.Л. О естественных механизмах мышления и интеллектуальных ЭВМ // Кибернетика и системный анализ. – 2003. – № 5. С. 82-88.
- [4] Хакен Г.М., Хакен-Крелль. Тайны восприятия. Синергетика, как ключ к мозгу. – М.: Институт комплексных исследований, 2002. – 272 с.
- [5] Гладун В.П. Планирование решений. – Киев: Наукова думка, 1987. – 167 с.
- [6] Глушков В.М., Рабинович З.Л. Проблемы автоматизации дедуктивных построений // Управление, информация, интеллект / Под. ред. Берга А.Н., Бирюкова Б.В., Геллера Е.С., Поварова Т.Н. – М.: Мысль, 1976. – ч. 4, гл. 2 – С. 300-326.
- [7] Geoffrey E. Hinton mapping part-whole hierarchies into connectionist networks. //Artif. Intellig. 46 (1990) No 1/2, 47–75
- [8] Рабинович З.Л. О концепции машинного интеллекта и ее развитии. – Кибернетика и системный анализ. – 1995. – № 2. С. 163-173.
- [9] Коваль В.Н., Булаченко О.Н., Рабинович З.Л. Интеллектуальные решающие машины как основа высокопроизводительных вычислительных машин. – Управляющие системы и машины. №36, 1998, с. 43-52.
- [10] Koval V., Bulavenko O., Rabinovich Z.: Parallel Architectures and Their Development on the Basis of Intelligent Solving Machines. // Proc. of the Intern. Conf. of Parallel Computing in Electrical Engineering. - Warsaw, Poland, September 22-25 (2002) 21–26.

---

## Информация об авторе

---

**Рабинович Зиновий Львович** – профессор, доктор технических наук, Институт кибернетики им. В.М.Глушкова, просп-т акад. Глушкова, 40 03680, Киев-187, Украина; e-mail: [eco@public.icyb.kiev.ua](mailto:eco@public.icyb.kiev.ua)

## НОВОЕ СОДЕРЖАНИЕ В СТАРЫХ ПОНЯТИЯХ: К ПОНИМАНИЮ МЕХАНИЗМОВ МЫШЛЕНИЯ И СОЗНАНИЯ

Геннадий С. Воронков

**Abstract:** *The work is written in the form of glossary. Its extended papers discuss the pairs of notions comprising the problem of the brain: thinking and consciousness, consciousness and sensation, mind and consciousness, model and information. The author is developing the approach, based on the paradigm "The brain as neuron model", which introduces the new content in these notions.*

**Keywords:** *thinking, consciousness, mind, sensation, model, information.*

---

### Введение

С развитием старых и/или появлением новых концепций составляющие их понятия изменяются. Развитие представлений, понятий по спирали предполагает наполнение их качественно новым содержанием. Новое содержание может постепенно вытеснить старое, тогда понятие коренным образом преобразуется, эволюционирует. Иногда преобразованное представление-понятие может оказаться, как и ветвь эволюционного древа, тупиковым. Необходимость возврата научного поиска к исходным позициям, к прежним значениям старых понятий воспринимается в таких случаях как "новое суть забытое (или утраченное) старое". Появление абсолютно новых понятий – чрезвычайно редкое событие. Кажется, в эволюции понятий, связанных с "проблемой мозга", можно наблюдать почти все эти "превратности судьбы". В работе рассматриваются пары основных понятий, составляющих "проблему мозга": мышление и сознание, сознание и ощущение, разум и сознание, модель и информация - как они понимаются в концепции мышления [1-7], развиваемой на базе "модельной парадигмы" = "модельного подхода" [8-13]. При этом преследуется цель показать те изменения и новые моменты, которые вносит развитие модельного подхода (МП) в эти понятия. Работа написана в форме расширенных статей к глоссарию.

---

### "Глоссарий"

**1. Мышление и сознание.** В "модельном подходе" (МП) "мышление" и "сознание" строго дифференцированные понятия. Под мышлением в МП понимается совокупность операций (с нейронными моделями), являющихся по сути процессами решения задач [1-7], в том числе творческого характера. Под "сознанием" (в значении феномен, субъективное проявление деятельности мозга) понимается совокупность ощущений, коррелирующих с состоянием актуализации (возбуждения) нейронов, участвующих в мышлении. Предполагается, что операции с нейронными моделями могут быть описаны нейрофизиологическими терминами, в рамках модельной парадигмы [8-13]. Поэтому мышление в принципе может быть смоделировано. Трудности на пути моделирования мышления это, говоря словами Куна [14], "головоломки нормальной науки". Ощущение же остается до сих пор в принципе непонятным явлением, парадигмальные рамки для него не установлены. Поэтому о моделировании сознания-ощущения, как актуальной задаче, говорить преждевременно.

В литературе термин "мышление" используется часто, почти традиционно, как синонимичный термину "сознание" (из недавних работ см. [15]). Это говорит о том, что понятия "мышление" и "сознание" в широко распространенном понимании остаются до сих пор не дифференцируемыми понятиями. (То же относится к дифференцировке понятий "разум" и "мышление"; о понятии "разум" см. п. 3). При таком их понимании приводимые аргументы в отношении моделируемости\не-моделируемости сознания\мышления являются, с точки зрения МП, спорными.

О других значениях понятий "мышление" и "сознание" см. п. 3.

**2. Сознание как ощущение.** Форм ощущений много. Голод, жажда, радость, печаль, видение, обоняние – лишь немногие примеры чувств, ощущений. Каждое из них коррелирует с работой (состоянием активности, возбуждения) нейронов определенных структур мозга. Следует отметить однако, что активирование нейронов целого ряда структур не сопровождается какими-либо ощущениями. Например, активность нейронов эфферентных структур, управляющих мышцами.

Язык прямо называет сознание чувством, то есть ощущением. Так, синонимом термина "прийти в сознание" является термин "прийти в чувство"; о *понимании, осознании* чего-либо говорят "с чувством понимания", "с сознанием\чувством долга"; как о ярком *чувстве* обретенной мысли говорят об "озарении". Эти разные проявления сознания-чувства не имеют четко выраженной специфической модальности. Видимо, последнее затрудняет их дифференцировку. Действительно, например, часто используют одно и то же слово "*понимание*" при понимании и читаемого слова, и при *узнавании (осмыслении)* рассматриваемого объекта, хотя работают при этом разные мозговые структуры и, следовательно, чувства *понимания* того и другого должны как-то различаться. Тем не менее, язык, видимо, разделил, дифференцировал эти ощущения - дал им разные имена, обозначил разными словами<sup>1</sup> (см. ниже).

С точки зрения МП, модальные ощущения (*видение, слышание* и другие) суть корреляты активности нейронов, соответствующих (поставленных в соответствие) элементарным стимулам. Тогда как с работой нейронов, поставленных в соответствие комплексным стимулам (как единичным объектам), коррелируют ощущения *осмысления, разумения, понимания*. Например, поточечное представление нейронами зрительного поля осуществлено, видимо, в НКТ; коррелятом работы этих нейронов является ощущение детального *видения* всего, что находится в данный момент в зрительном поле. Комплексные, сложные "стимулы" представлены нейронами во множестве полей новой коры; коррелирующие с их работой ощущения (*разумения, понимания*) либо лишены модальности, либо последняя слабо выражена.

В Типовой структуре Элементарного сенсориума [7, 10-12] нейронами, соответствующими элементарным стимулам", являются квазисимвольные нейроны – они не испытывают конвергенции проекций рецепторов и соединены с ними по типу 1:1. По причине *конвергенции* рецепторных проекций на *символьном* нейроне, коррелирующее с его работой ощущение отличается (теоретически) от коррелята квазисимвольного нейрона. Отличие состоит в уменьшении модальной выраженности ощущения: чем выше иерархический уровень Типовой структуры, тем менее выражена модальность коррелирующих с работой её нейронов ощущений; специфическая модальность утрачивается полностью у нейронов надмодальных полей.

Ощущениями сопровождается также работа нейронов языковой системы (ЯС). Действительно, слышимое слово идентифицируется, опознается именно как данное слово; последнее может быть понято, как обозначающее что-то конкретное; оно может быть осознано и в связи с контекстом данной речи. Этим перечисленным ситуациям соответствует в Элементарной языковой системе [1-3, 10-12] работа нейронов Типовых структур разного иерархического уровня; с работой этих нейронов коррелируют соответствующие ощущения – так же, как в сенсориуме.

В данной работе предпринята попытка (см. п. 3), в первом приближении, именовать отдельно иерархические формы ощущений, коррелирующие с работой сенсориума и коррелирующие с работой языковой системы, соответственно словами из двух разных групп слов. В Таблице 1 представлены некоторые из этих слов. Первую группу составляют слова, однокорневые и/или близкие слову "разум", которыми, мы полагаем, язык означил процессы и феномены, характерные для сенсориума; вторую составляют слова, однокорневые и/или близкие слову "сознание", характеризующие языковую систему.

**3. Разум и Сознание.** В Таблице 2 представлены 3 иерархических уровня в сенсориуме (элементарном - ЭС и естественном - ЕС) и 3 уровня в языковой системе (ЭЯС и ЕЯС). Словом **Разум** (с прописной буквы) обозначен "блок" – совокупность верхних уровней сенсориума. Здесь нейронами, организованными в Типовые структуры, представлена сенсорная среда; здесь активируются нейронные модели, представляющие актуальную среду (объекты), и осуществляется оперирование этими моделями (мышление; см. п. 4). Взятые из Таблицы 1 словами, принадлежащими группе **Разум**, здесь обозначены

<sup>1</sup> Имеется в виду естественный процесс именования, происходивший в эволюции языка человека.

иерархические формы ощущений, коррелирующих с работой нейронов этих уровней. Симметрично, словом **Сознание** обозначен блок верхних уровней языковой системы и корреляты (ощущения) активности нейронов этих уровней. Следует заметить, что в обозначениях двух блоков имеет место некоторая асимметрия: слово *разум* именуется только блок **Разум**, само же ощущение здесь обозначено словом "*разумение*", тогда как словом *сознание* обозначен и блок **Сознание** и само ощущение "*сознание*". Асимметрия проявляется и между словами двух групп слов в целом (см. Табл.1), в том числе при попытке установить между ними (попарно) аналогию (два столбца слов в центре Таблицы 1). Асимметрию можно объяснить спецификой каждой из систем, отразившейся в языке.

Наклонной штриховкой в Таблице 2 выделен блок, объединяющий в единое целое блоки **Разум** и **Сознание**. Этот выделенный блок можно обозначить с равным правом и словом **СОЗНАНИЕ** (прописными буквами) и словом **РАЗУМ**. Вероятно, такое значение, включающее в себя, кроме того, по два других значения (см. выше), скрывается за словами **СОЗНАНИЕ** и **РАЗУМ** в обычном, традиционном, без дифференцировки и как синонимы, их употреблении.

Здесь снова подчеркнем, что об ощущениях можно говорить пока только как о *коррелятах*, - следовательно, обозначенные в Таблице 2 структуры не являются обязательно *местом локализации* ощущений.

Таблица 1. Однокорневые и близкие слова к словам Разум и Сознание и попытка составить из них пары слов-аналогов

<b>Разум</b>	<b>Сознание</b>
<i>разумение,</i> <i>разуметь,</i> <i>уразуметь,</i> <i>уразумевать</i> <i>уразумение</i> <i>умение,</i> <i>уметь,</i> <i>умник</i> <i>умный</i> <i>ум</i>	<i>сознание</i> <i>сознавать</i> <i>осознать</i> <i>осознавать</i> <i>осознание,</i> <i>знание,</i> <i>знать</i> <i>знаток</i> <i>знающий</i> <i>знание ?</i>
осмысливать осмысление, осмыслить смыслить смысл, мысль мыслить Мышление	опознавать, опознание, опознать, познать, значение, знак ? значить, Познавание
<i>умничать, недоумение, недоразумение</i> <i>думать, подумать, надоумить, дума</i> <i>усомниться, сомнение, мнить, мнение</i> <i>умысел, замышлять, замысел,</i> <i>смекаль, смекалка, смётка,</i> <i>намёк, мечтать, мечта</i> М ?	означивать, <i>узнавать</i> опознавание, <i>узнавание</i> <i>узнать</i> понять, <i>знать,</i> понятие, <i>знание</i> <i>значение, понятие</i> понимать
	познавать, познание, <i>знамение</i> понимание внять, <i>внимать, внимлеть</i> <i>внимание</i>
	Н ?

**4. МЫШЛЕНИЕ.** Этим словом (прописными буквами) здесь обозначена совокупность двух процессов в объединенном блоке **СОЗНАНИЕ\РАЗУМ**, именно, процессов **Мышления** и **Познавания** (см. п. 3; Таблица 2). Предполагается, что это объединение не только формальное: оба блока, **Разум** и **Сознание**

= сенсориум и языковая система (ЯС), объединены взаимодозначными связями и работают в тесном взаимодействии. Связь осуществляется между их символьными нейронами: в Элементарном сенсориуме последние представлены нейронами-смыслами (синоним – символьные нейроны), в Элементарной ЯС – нейронами-понятиями [1-3, 10-12]. Некоторые данные заставляют предполагать, что связь между парой нейрон-смысл – нейрон-понятие опосредуется еще промежуточным нейроном.

**Таблица 2. Формы ощущений как корреляты активированных нейронных структур (Элементарных и естественных сенсориумов, ЭС и ЕС, и языковых систем, ЭЯС и ЕЯС) и их лексические обозначения**

Формы ощущений (описание в традиционных терминах), иерархические уровни 1-3 в ЭС, ЕС и ЭЯС, ЕЯС	Уровни	Нейронные структуры и лексические обозначения ощущений				
		Нейронные структуры ЭС и ЭЯС	Термины	Значение терминов	Примеры нейронных структур ЕС и ЕЯС	
Модальное ощущение видения (слышания, обоняния и т.д.) объектов актуальной среды (феномен "смотрю, но не узнаю, не понимаю")	1	Квазисимвольные нейроны, соответствующие элемент. стимулам	"Бесмысленное блуждание взором"	Глядеть не видя	Наружное коленчатое тело	Сенсориум (ЭС и ЕС, оба полушария)
Ощущение разумения (понимания, узнавания) объектов актуальной среды (плюс феномен "blindsight", "слепозрение" - не вижу, но узнаю, понимаю)	2	Поля символьных нейронов минус "сигнификат"	Осмысление Мышление (образное, эмпирическое) Разум	Обретение мысли. Оперирование мыслями, в том числе их творение	Частью первичная кора и поля "ассоциативной" коры  Височная и фронтальная кора. ?	
Ощущение осмысления (понимания, узнавания) актуальных объектов в их взаимосвязи в среде (понимание контекста).	3	Поля символьных нейронов плюс "сигнификат"	разуметь <i>разумение</i>	Находиться с чувством обретенной мысли.	?	
Ощущение понимания текущей речи, в том числе во взаимосвязи (в контексте) как с предшествующими высказываниями, так и с имеющимся у субъекта знанием.	3	Поля нейронных понятий плюс "сигнификат"	<i>сознание, сознать</i>  Сознание Познание (Мышление теоретическое, логическое)	Находиться со знанием, пониманием  Оперирование понятиями, знаниями, в том числе их порождение	Фронтальные области языковой системы	Языковая система (ЭЯС и ЕЯС, левое полушарие)
Ощущение понимания только прямого значения слов речи, без понимания контекста и без учета собственных знаний субъекта.	2	Поля нейронных понятий минус "сигнификат"	<i>осознание, понимание</i>	Обретение чувства знания-понимания.	?	
"Модальное" ощущение различения слов речи без их понимания (феномен "слышать не понимая")	1	Поля нейронных слов.	Поговорка "слышал звон, да не знает, где он".	Слышал принесенные слова, но не понял их	Часть поля Брока	

Такая связь между двумя блоками=системами могла бы обеспечивать работу каждой системы также в автономном (до некоторой степени) режиме. Именно в автономном режиме должна проявляться специфика работы каждой системы, блоков **Разум** и **Сознание**. Существование этой специфики предполагается не только на основе теоретических представлений, но и обосновывается нейропсихологическими данными, полученными в условиях избирательной блокады левого или правого полушария [16]. Эти данные согласуются с предположением, что **Познавание** (мышление в ЯС) отличается формальным характером. Так, испытуемые с заблокированным правым и (в то же время) не заблокированным левым<sup>2</sup> полушарием при решении силлогизмов с ложными посылками используют только формально-логические операции, не обращая внимания на абсурдность посылок.

Нейрофизиологические механизмы формирования нейронных моделей, а также механизмы оперирования моделями, лежащие в основе решения задач, могут быть, тем не менее, в принципе сходными в обоих блоках.

Очевидно, формирование нейронных моделей сред, сенсорной и языковой, осуществляется сначала по генетической программе во взаимодействии со средами, затем - в основном путем обучения, в том числе с учителем. Благодаря выраженной коммуникативной функции, ЯС играет, видимо, чрезвычайно важную роль как посредник в формировании блока Разум при обучении с учителем. Высказано предположение [7] о ключевой роли ЯС в чрезвычайно быстром (по эволюционным меркам) развитии мозга человека.

С точки зрения МП, перечисляемые ниже 6 типов операций в нейронных моделях непосредственно (блоки **Разум** и **Сознание**) или с привлечением дополнительных структур уже достаточны, чтобы объяснить механизм решения, или смоделировать его, по крайней мере, для некоторых очень больших классов задач. 1) Постановка в соответствие нейронов нейронной модели оригиналам среды. Другими словами, формирование иерархической, составленной из Типовых структур (ТС) нейронной модели среды, формирование ДП. 2) Реализация соответствия. Другими словами, избирательное активирование нейронов в ТС, соответствующих определенной среде, с помощью механизма реализации соответствия (МРС) при актуализации этой среды. 3) Реализация "состояния опознания" – динамического аттрактора, характеризующегося устойчивой на определенное время синхронной ритмичной активностью нейронов Типовых структур, соответствующих данному объекту (картине). 4) Выявление идентичности актуализированной нейронной модели объекта-образца с одной из множества последующих актуализированных нейронных моделей других объектов. Другими словами, обнаружение среди множества объектов объекта, сходного с образцом. 5) Выявление идентичности (сходства) соответствующих иерархических уровней (свойств) двух актуализированных нейронных моделей. Другими словами, выявление аналогий между объектами. 6) Постановка в соответствие (образование, установление связей) нейронов одной актуализированной модели нейронам другой актуализированной модели.

Возможность реализации операций 1-3 в Элементарном сенсориуме в определенной степени проанализирована в работах [6-7]. Некоторые из перечисленных операций реализованы в компьютерных моделях. Так, при компьютерном моделировании обонятельной системы в принципе реализованы варианты операций 1-4 (см. ссылки в [Воронков, Изотов; настоящий сб.]). Реализация (в рамках модельной парадигмы) процесса 5 позволила бы моделировать "решение задач по аналогии". Реализация операции 6 позволила бы, в принципе, решать задачу образования условных связей, другими словами, - реализовать функцию "если - А, то - В",  $\{A, A \rightarrow B\} \Rightarrow B$ . Экспериментальные и теоретические данные исследований нейрофизиологов в этом направлении уже позволяют моделировать нейронные механизмы этой операции.

**5. Модель и информация.** "Модель" - традиционно "антропоморфное" понятие: модель – следовательно, "ищите человека", без его сознания модели не создаются и не существуют. Таков контекст толкования понятия "модель" в словарях. С точки зрения МП, мозг суть нейронная модель, он создан в ходе прогрессивной эволюции не по воле, не в результате сознательной, плановой деятельности человека – в

<sup>2</sup> Именно в левом полушарии локализуется языковая система

принципе, как и все другие органы.<sup>3</sup> Следуя этой логике, - природе свойственно создавать модели. Более того, если следовать пониманию, что "моделью является всё, что поставлено в соответствие", то в отношении любого объекта можно сказать, что в одних условиях он выступает как объект-модель, в других - как объект-оригинал. Мозг, как целостный объект, не является в этом отношении исключением и тоже выступает как "двуликий Янус"<sup>4</sup>: направление процесса в сенсорииуме и процесса в эфферентной системе противоположны, именно, от среды в мозг и от мозга в среду, соответственно (см. ниже; рис. 1).

Однако, анализ механизмов, осуществляющих соответствие (механизмов постановки в соответствие – МПС и механизмов реализации соответствия – МРС), показывает, что большинство объектов, после того как они поставлены в соответствие, лишены МРС, и их соответствие не может быть реализованным без системы, способной воссоздать МРС (универсальной системой в этом отношении является мозг; см. ниже приводимые примеры).

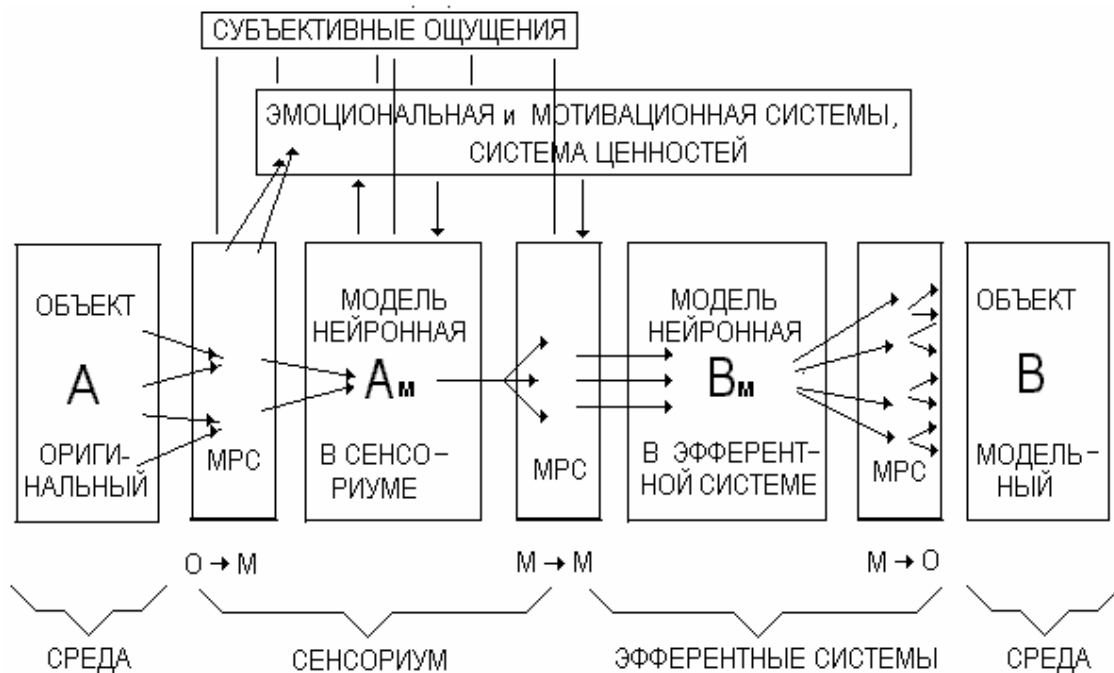


Рис. 1. Рефлекторная дуга как последовательность процессов реализации соответствия.

МРС – механизм реализации соответствия; О – М направление процесса от объекта-оригинала среды к нейронной модели; М – М - от модели в сенсорииуме к модели в эфферентной системе; М – О - от модели к объекту-модели среды.

Если посмотреть на декартовскую немного модифицированную схему рефлекса (рис. 1) с точки зрения модельного подхода, можно видеть, что вся рефлекторная дуга есть, по сути, последовательный ряд постановок в соответствие. Действительно, объекту-оригиналу А внешней среды ставится в соответствие нейронная модель А<sub>м</sub> в сенсорной системе, последней (А<sub>м</sub>) ставится в соответствие нейронная модель В<sub>м</sub> в эфферентной системе, а этой модели (В<sub>м</sub>) ставится в соответствие объект-модель В среды – определенная композиция мышечных сокращений, рефлекс, двигательный акт, двигательный образ, поведение. Если учесть возможности с помощью двигательных актов манипулировать с объектами, то окажется, что в соответствие А в конечном итоге может быть поставлен в принципе любой объект (объект-модель В может быть выбран из очень большого множества объектов среды) – выбор из них будет зависеть от того, как организован механизм выбора (МРС) между моделью А<sub>м</sub> (в сенсорииуме) и моделями в эфферентной системе и под какими влияниями он находится. Возможности мозга могут показаться в

<sup>3</sup> Теоретически, участие мозга в эволюции тканей и органов, по-видимому, нельзя исключить [12].

Однако при этом не идет речь об осознанном участии.

<sup>4</sup> В римской мифологии бог "входов" и "выходов"; изображался с двумя лицами, обращенными в противоположные стороны.

контексте излагаемого еще более неожиданными, хотя являются повседневной практикой: с помощью мозга в соответствие может быть поставлен практически любой объект (доступный органам чувств) любому другому объекту без оказания на них какого бы то ни было воздействия, получая лишь слабые воздействия от них на органы чувств. При этом связь соответствия между этими объектами, оригинал – модель, будет существовать в виде нейронной связи между нейронными моделями этих объектов.

Быть связанным связью соответствия означает, что в случае актуализации А объекта (или его нейронной модели в сенсориуме) актуализируется (получает воздействие, активируется) МРС, приводящий к актуализации В объект (или его нейронную модель). МРС (и МПС), его нейронная организация и принципы работы – "головоломка" нейрофизиологии и целого комплекса нейронаук.

Только человек (или инопланетянин) может увидеть в схематическом изображении солнечной системы модель последней - благодаря способности мозга создать нейронную модель схемы и нейронную модель солнечной системы и способности решить задачу "на сходство" двух нейронных моделей (см. п. 4), то есть установить сходство моделей в некотором аспекте.

Механизм постановки в соответствие (МПС) оригиналу изображения на фотоэмульсии во многом сходен с МПС оригиналу изображения на сетчатке. Однако, фотография, сама по себе, не имеет связи соответствия (МРС) с оригиналом. Тогда как, в сенсориуме, между нейронной моделью (запомненного оригинала или рассматриваемого фото) и нейронной моделью оригинала (в случае его повторной актуализации), возможно установление соответствия, сходства – благодаря МРС (для запомненного, знакомого оригинала) или благодаря механизму, обнаруживающему соответствие между двумя нейронными моделями (см. п. 4).

Можно найти примеры неживых объектов, имеющих МРС. Таковыми являются искусственные нейросети; в качестве механического МРС выступает система рычагов между клавиатурой и литерами. Обыкновенная печать есть модель, сама же она есть и МРС: при тиснении она ставит в соответствие оригиналу его копию (его модель). Здесь отметим важный момент. Печать и копия обе модели одного оригинала. Однако, одна зеркальная. Так же зеркальны оригиналу изображение (модель) в зеркале, на сетчатке глаза и на эмульсии фотопленки.

Матричный механизм воспроизводства ДНК есть ничто иное как МРС. В данном случае МРС тоже зеркален.

Эти примеры свидетельствуют, что МПС есть оператор, ставящий в соответствие согласно определенному правилу. В принципе, это может быть любая функция. Поэтому объект-модель В не обязательно является изоморфным оригиналу А, например геометрически. Геометрический (или любой другой) изоморфизм между моделью и оригиналом – частный случай. Тем не менее, чаще всего именно в этом случае объект-модель идентифицируется как модель в обычном (узком) понимании; и именно сохранение изоморфизма в каком-либо определенном аспекте свойств объектов (пространственных характеристик, временных последовательностей или других) – одно из основных требований к МПС и МРС технических информационных систем. Термин "передавать информацию" означает, с точки зрения МП, ставить в соответствие оригиналу (его свойствам) изоморфный в отношении определенных свойств (оригинала) объект-модель.

В то же время, возникает вопрос об особенностях и границах применимости (возможности осуществления) этих операций на разных уровнях организации материи - квантовом, молекулярном (геном), клеточном (мозг), макрообъектов (социум) - в условиях заданных требований изоморфности.

---

## Выводы

---

1. Мышление, с одной стороны, разум и сознание, с другой, обозначают понятия разной категории. Мышление суть нейрофизиологические процессы оперирования с нейронными моделями, тогда как терминами "разум" и "сознание" обозначены совокупности ощущений, коррелирующих с работой нейронов этих моделей.
2. Природа и механизмы ощущений, если последние не отождествлять с нейрофизиологическими процессами, остаются неясными.

3. Предполагается, что две группы слов (в русском языке), однокорневых и/или близких соответственно к словам "разум" и "сознание", были выделены языком для характеристики субъективных проявлений, коррелирующих с работой, соответственно, сенсориума и языковой системы.
4. Расширено понятие "модель". Приведены примеры *природных* "операторов" соответствия – механизмов постановки в соответствие (МПС) и механизмов реализации соответствия (МРС). Наиболее универсальными среди них являются мозговые механизмы (в том числе мозг как целое).
5. "Информация" (в наиболее принятом понимании – как "сведения") входит в понятие "модель" как частный случай: она есть изоморфная модель в каком-либо из аспектов свойств оригинала.

---

## Литература

---

- [1] Воронков Г.С., Рабинович З.Л. Сенсорная и языковая системы – две формы представления знаний. \ Новости искусственного интеллекта, 1993, № 2, с. 116-124.
- [2] Воронков Г.С. Языковая и сенсорная системы; некоторые параллели в принципах нейронной организации двух семиотических систем. \ Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16, Биология, 1994, вып. 1, с. 3-9.
- [3] Рабинович З.Л., Воронков Г.С. Представление и обработка знаний во взаимодействии сенсорной и языковой нейросистем человека. \ Кибернетика и системный анализ, 1998, №2, с. 3-11.
- [4] G. Voronkov, Z. Rabinovich. Cognitive model of memory and thinking. \ International Journal on Information theories and applications, 2000, v. VII, N 4, pp. 164-169.
- [5] Воронков Г.С., Рабинович З. Л. Естественная среда памяти и мышления: модельное представление. \ Труды Международной научно-практической конференции KDS-2001 "Знание-Диалог-Решение". – Санкт-Петербург, июнь, 2001. СПб.: "Лань", том I, с. 110-115.
- [6] G. Voronkov, Z. Rabinovich. On neuron mechanisms used to resolve mental problems of identification and learning in sensorim. \ International Journal on Information theories and applications, 2003, v. 10, N 1, pp. 23-28.
- [7] Воронков Г. С. Механизмы решения задач в элементарном сенсориуме: нейронные механизмы опознания и сенсорного обучения. \ Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2004, № 2-3, с. 92-100.
- [8] Воронков Г.С. Сенсорная система как нейронная семиотическая модель адекватной среды. В сб. Сравнительная физиология высшей нервной деятельности человека и животных, 1990. М.: Наука, с. 9-21.
- [9] Voronkov G.S. The neurone-model outlook on sensory system as a novel paradigm in sensory communication. \ The RNSN/IEEE Symposium Neuroinformatics and Neurocomputers Rostov-on-Don, Russia, october 7-10, 1992, vol 2, pp. 1231-1243.
- [10] Воронков Г. С. Модельный подход как новая парадигма в теории связи в сенсорных системах. \ Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16, Биология, 1993, вып. 1, с. 3-10.
- [11] Воронков Г.С. Информация и мозг. \ Труды Международной научно-практической конференции KDS-2001 "Знание-Диалог-Решение". – Санкт-Петербург, июнь, 2001. СПб.: "Лань", том I, с. 102-109.
- [12] Воронков Г. С. Информация и мозг: взгляд нейрофизиолога. \ Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2002, № 1-2, с. 79-88.
- [13] Воронков Г.С. Мозг и информация. \ Научная сессия МИФИ-2002. IV Всероссийская научно-техническая конференция Нейроинформатика-2002. Материалы дискуссии. – Москва 2003, с.137-147. (<http://www.biolog.ru/vnd/>)
- [14] Кун Т. Структура научных революций. М.: ООО "Издательство АСТ", 2001. – 608 с.
- [15] Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум. М.: Мир 2004. – 190 с.
- [16] Деглин В. Л. Парадоксальные стороны человеческого мышления. Нейропсихологический анализ. Санкт-Петербург, 1996. – 36 с.

---

## Информация об авторе

---

**Геннадий С. Воронков** – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, 119992, Россия; e-mail: [gsv@comtv.ru](mailto:gsv@comtv.ru)

## ФОРМИРОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБОНЯТЕЛЬНОЙ КОРЕ: ОБУЧЕНИЕ ПУТЕМ ПРОРАСТАНИЯ

Геннадий С. Воронков, Владимир А. Изотов

**Abstract:** *The computer model is offered to describe the formation of selective connections of the olfactory bulb neurons (OB-network) with the olfactory cortex neurons (OC-network) during sensory training. The model is based on the previously constructed computer model of the olfactory epithelium (OE) – OB. The process includes the growth of axons from OB-network into OC-network and the establishment the conjunctural input between OB and OC neurons. Supposedly, the simulated process approximately reflects the natural process in OB-OC. Likewise, the work concerns some conceptual questions related to the information representation and processing in the olfactory and other sensory systems, in particular, the "combinatorial explosion" problem.*

**Keywords:** *computer modelling, olfactory cortex, learning via axon growth, "combinatorial explosion" problem.*

---

### Введение

---

Настоящая работа продолжает работы авторов по компьютерному моделированию процессов обработки сенсорной информации в обонятельной системе млекопитающих [1-3]. В основу этих работ положен подход [4-6], согласно которому сенсориум есть нейронная модель сенсорного мира (экологической ниши вида) и, соответственно, обонятельная система есть нейронная модель запаховой сенсорной среды. Под нейронной моделью здесь понимается иерархически организованная сеть, рецепторные и нейронные элементы которой поставлены в соответствие объектам/свойствам среды: рецепторные – наиболее простым свойствам, а нейронные – комплексам этих свойств. Соответствие проявляется в избирательности (селективности) активирования этих элементов актуальными стимулами среды. Реализуют соответствие специфичность рецепторных клеток и избирательно конвергирующие аксонные проекции нейронов на нейронах следующего иерархического уровня. Нижние иерархические уровни формируются в основном по генетической программе, верхние – главным образом при обучении. Предполагается, что формирование модели экологической ниши происходит главным образом при сенсорном обучении в онтогенезе. Иницируют процесс сенсорного обучения воздействия адекватных раздражителей на рецепторы.

Примеры компьютерного моделирования формирования отдельных нейронов, представляющих каждый комплекс свойств сложного объекта, "путем прорастания" (см. ниже), нам не известны, в то же время, разработка растущих искусственных нейросетей, формирующих понятия, – актуальная задача в разработке компьютерных систем поддержки мыслительных процессов [7].

Описанная в предыдущих работах [1-3] компьютерная модель обонятельной луковицы (ОЛ-сеть) состоит из трех однородных (см. ниже) модулей. В модуле синаптически соединены (в обонятельном клубочке) группа из 4-х типов обонятельных рецепторных клеток и группа основных нейронов (митральные – МК и кисточковые – КК клетки; у млекопитающих количество клубочков и, следовательно, модулей несколько тысяч). Поскольку вопрос о количестве типов рецепторных клеток, конвергирующих в один клубочек, и характере их проекции на МК и КК остается открытым, принятая в базовой модели организация сенсорных входов в клубочке является предположительной – в случае появления соответствующих экспериментальных данных она может быть скорректирована. Каждый модельный модуль состоит из четырех МК (МК1, МК2, МК3 и МК4), каждая МК получает входы от одного типа рецепторных клеток. Каждый тип рецепторных клеток специфичен к определенной группе элементарных запахов условной (виртуальной) запаховой среды (см. [8]). В каждом модуле также имеются 11 КК, каждая из которых получает одно из сочетаний рецепторных входов: имеются КК12, КК13, ... КК123, ... и КК1234. Таким образом, МК и КК одного модуля ОЛ-сети поставлены в соответствие четырем типам рецепторных клеток и всем возможным сочетаниям из этих типов. В архитектуру ОЛ-сети входят также несколько типов интернейронов. Соотношение количеств нейронов (МК: КК: интернейроны) в модуле близко соответствует таковому, известному из морфологических данных [см. 9]. Смоделированные модули ОЛ-сети однородны

– в каждый проецируется один и тот же набор типов рецепторных клеток, различие состоит в соотношении количеств в наборе рецепторных клеток того или иного типа. В силу последнего при предъявлении сложного запаха в каждом из однородных модулей избирательно активизируются разные КК. Это обеспечивает представление множества оттенков однородных запахов (сочетаниями из КК). Очевидно, что в ОЛ много групп из однородных модулей, а не одна, как это имеет место в модели.

При предъявлении на вход ОЛ-сети сложного запаха виртуальной среды происходит процесс реализации соответствия, то есть, приведение в активность только тех МК и КК нейронов, которые представляют данный знакомый запах. ОЛ-сеть имеет оригинальную сложную архитектуру, учитывающую разделение функций МК и КК (каждая МК представляет какой-либо один тип рецепторных нейронов, тогда как каждая КК – какое-либо сочетание из этих типов) и сложную систему их связей (дендродендритные возбуждающие и тормозные опосредуемые вставочным нейронам, а также возвратные аксонные и другие). Эти связи носят вспомогательный характер, они обеспечивают преобразование активности нейронов в ритмическую, усиление и поддержание ее на некоторое время.

В работе предполагается, что на следующем синаптическом уровне, в обонятельной коре (ОК), именно, в передней пириформной коре, являющейся одной из основных проекционных зон МК и КК обонятельной луковицы (см. [9]), имеет место дальнейшая гетерогенная конвергенция: КК всех модулей ОЛ конвергируют на пирамидных клетках (ПК) передней пириформной коры в разных сочетаниях. Таким образом отдельные ПК представляют более сложные запаховые сочетания, чем отдельные КК. Однако, если в ОЛ имеется сравнительно небольшое число КК, то количество ПК, представляющих все теоретически возможные сочетания из КК всех модулей ОЛ, становится очень большим. Мы полагаем, что в ОК представлены пирамидными клетками не все теоретически возможные запахи (сочетания), а только те из них, которые составляют экологическую нишу данного вида; в то же время, все теоретически возможные запахи при этом могут быть воспринятыми (о решении этой "проблемы комбинаторного взрыва" см. в последнем разделе). Формирование этих ПК происходит, видимо, путем сенсорного обучения всякий раз при воздействии на рецепторные клетки новых запахов в онтогенезе, а также во взрослом состоянии. Под формированием модели экологической ниши мы понимаем постановку новых ПК в соответствие активированным новым сочетаниям КК и создание механизма, обеспечивающего реализацию соответствия. Предполагается, что предъявление сложного запаха, ранее не предъявлявшегося, приводит к возбуждению соответствующих (см. выше) МК и КК в ОЛ (сформированной по генетической программе). Возбуждение приводит к активизации роста аксонов МК и КК в направлении ОК. При контакте такого прорастающего аксона с одной из свободных ПК в ОК эта ПК становится источником некоторого фактора ("медиатора", см. [10]), направляющего к ней рост аксонов других нейронов прорастающей группы. Эти аксоны тоже вступают в контакт с этой ПК. В результате, аксоны разных модулей ОЛ, активированных данным сложным запахом конвергируют на одной ПК. Фактически это есть один из вариантов, реализующих принцип Хебба. В случае предъявления новых оттенков однородных запахов, конвергировать на ПК будут КК однородных модулей; в случае предъявления новых разнородных смесей, конвергировать на ПК будут КК из модулей разного рода. В результате этого процесса сложный запах как целое становится представленным отдельной ПК в ОК.

В настоящей работе описывается построенная компьютерная модель формирования ПК в передней пириформной коре. При этом учитываются следующие морфофизиологические данные в отношении ОК (см. [9]). В переднюю пириформную проецируются оба типа основных нейронов ОЛ, МК и КК (тогда как в заднюю – только МК); ОК состоит из нескольких популяций ПК; в ОК сильно развиты ассоциативные связи между ПК (как внутренние, так и с другими отделами ОК); имеются тормозные вставочные нейроны; в ОК отсутствует выраженный модульный принцип организации (и в этом отношении она подобна ассоциативным областям новой коры). Поскольку функциональная роль разных типов нейронов и ассоциативных связей в ОК окончательно не установлена (см. [9, 11]), придаваемое им авторами модели функциональное значение носит в определенной степени предположительный характер. Работа затрагивает также ряд концептуальных вопросов относящихся к обработке информации в обонятельной и других сенсорных системах, именно: 1) каким образом представлена информация в обонятельной системе на разных иерархических уровнях (рецепторный, ОЛ, ОК), 2) каким образом достигается тонкое различение запахов (оттенков), 3) каким образом формируется механизм реализации соответствия нейронов ОК к новым сложным запахам, 4) каким образом решается проблема "комбинаторного взрыва".

---

## Алгоритм сенсорного обучения прорастанием

---

В качестве "пространства" компьютерной модели служит рабочее поле монитора компьютера. В верхней части экрана располагаются МК и КК обонятельной луковицы. Выходные сигналы этих основных нейронов ОЛ формируются в соответствии с алгоритмом [1]. В нижней части экрана располагаются пирамидные клетки (ПК) и вставочные нейроны передней пириформной коры. В модели реализована возможность установки каждой клетки в любом доступном месте экрана монитора. Вся свободная от клеток область представляет собой зону роста аксонов. Каждому пикселу зоны роста случайным образом присваивается характеристика, названная "плотностью и отражающая физические свойства субстрата. Рост аксонов МК и КК происходит в рамках сценария работы компьютерной модели ОЛ [2]. На вход модели подается один из стимулов условной обонятельной среды (см.[8]). В ответ активируются соответствующие этому стимулу МК и КК каждого из трех модельных модулей ОЛ. Конусы роста аксонов активированных клеток производят "поисковые" действия в прилегающем к ним "пространстве". Определив пиксел с наименьшей плотностью аксон прорастает в этом направлении. Таким образом, в случае повторяющегося на входе стимула формируется группа одновременно прорастающих аксонов основных нейронов ОЛ. Когда один из аксонов этой группы прорастет достаточно близко к какой-либо из свободных ПК пириформной коры, он попадает в область дендритного дерева этой клетки и в результате образует синаптический контакт с одним из её апикальных дендритов. Установившая контакт ПК начинает выделять "медиатор". Двигаясь по градиенту "медиатора", остальные растущие аксоны вступают в контакт с этой же ПК. При установлении определенного числа контактов ПК прекращает выделение "медиатора", завершая тем самым процесс формирования связей с ОЛ. Далее, на вход модели подается другой стимул и формируется новая группа прорастающих аксонов, которая установит контакт с новой ПК. Согласно представлениям, заложенным в модель, необходимо, чтобы аксоны от МК и КК не смешивались при прорастании. Это достигается разнесением во времени процесса прорастания аксонов от разных типов нейронов (разное время созревания МК и КК). В модели первыми (как и в ОЛ, см. [9]) прорастают аксоны митральных клеток.

Наряду с прорастанием связей от ОЛ-сети к ОК, в модели реализовано формирование горизонтальных связей между различными ПК, опосредованное вставочными нейронами. Так, введено торможение между ПК, имеющими идентичные входы от КК из ОЛ. Если после установления контакта с ПК продолжать подачу входного стимула, то аксоны активированной группы КК начинают прорастать к другой ПК. В результате, после установления контакта со второй ПК, обе пирамидные клетки будут отвечать на один и тот же входной стимул (таким образом представительство сложного запаха дублируется несколькими ПК). После образования связей ОЛ с ОК пирамидные клетки последней тоже начинают прорастать и устанавливаются контакты с ближайшими к ним вставочными нейронами. Вставочные нейроны, в свою очередь, направляют свои аксоны к активированным ПК и устанавливают с ними тормозные связи. Таким образом обе ПК оказываются связанными друг с другом тормозными связями через вставочные нейроны. Эта сформированная связь осуществляет по сути латеральное торможение: из двух (или более) ПК, поставленных в соответствие одному и тому же стимулу из обучающей выборки, избирательно активироваться будет только "сильнейшая" ПК (сформировавшая больше входов). При выходе этой клетки из строя, её заменяет клетка-дублер и т. д.

Сходный с описанным алгоритм реализован также между двумя типами ПК, именно, между получающими входы из модулей ОЛ-сети только от МК (обозначим их ПК(МК)) и только от КК (обозначим их ПК(КК)). Однако торможение здесь однонаправленное: ПК(КК), тормозит ПК(МК). Организованное таким образом торможение позволило реализовать алгоритм формирования новых ПК пириформной коры, функционирующий после завершения "онтогенеза". Именно, при подаче на вход уже сформированной модели нового незнакомого запаха ни одна из ПК(КК) не соответствует этому запаху (поскольку отсутствуют ПК с таким новым сочетанием входов от КК), и таким образом среди этих ПК активированных не будет. В то же время, ПК(МК), соответствующие отдельным компонентам данного запаха, активируются и не испытывают торможения со стороны ПК(КК). Таким образом, ПК(МК) являются в ОК "нейронами новизны". Эти ПК(МК) в компьютерной модели связаны возбуждающим путем с ПК еще одного типа, которые назовём "внутренними". Последние имеют возбуждающие входы от "эмоциональной системы" и посылают свои аксоны к свободным ПК, не имеющим никаких связей с ОЛ. При наличии активности от ПК(МК), а также от "эмоционального" входа, подтверждающего важность данного запаха,

внутренняя ПК возбуждает свободную ПК. Эта свободная ПК начинает выделять "медиатор" и аксоны кисточковых клеток ОЛ, активированных входным стимулом, прорастают к данной свободной ПК, направляемые градиентом "медиатора". Таким образом данному новому запаху ставится в соответствие некоторая свободная ПК и формируется реализующий это соответствие механизм (в виде конвергирующих на этой ПК аксонов от нового активированного сочетания кисточковых клеток ОЛ-сети), новый запах "переводится в разряд знакомых". При поступлении другого незнакомого запаха процесс повторяется, и в соответствие другому новому запаху ставится другая свободная ПК.

Поскольку в описываемой модели ОЛ-ОК отсутствует модель эмоциональной системы, роль последней выполняется экспериментатором. Что касается биологического прототипа механизма вовлечения эмоциональной системы, то предполагается, что последнюю активируют "нейроны новизны", то есть ПК(МК), активирующиеся только при предъявлении нового запаха; входы, модулирующие ОК и ОЛ и являющиеся прототипом входов от эмоциональной системы, показаны (см.[9,11]).

---

### Результаты экспериментирования с моделью, обсуждение и выводы

---

В экспериментах в первую очередь изучалось свойство модели ОК ставить ПК в соответствие предъявляемым запахам и проверялась способность этих ПК избирательно реагировать на предъявляемые запахи виртуальной обонятельной среды. Для этого формировался определенный небольшой набор запахов виртуальной среды и подавался на вход модели. Модель переводилась в режим обучения прорастанием. После завершения формирования связей МК и КК с ПК, модель переводилась в режим опознавания стимулов. В режиме опознавания на входы обонятельных рецепторных клеток подавался тестирующий запах и регистрировалась реакция пирамидных клеток модели. Модель проявляла следующие варианты ответов. Если подавался один из запахов, входивший в обучающий набор, то всегда активировалась только одна из ПК(КК). Если стимул отличался от стимулов обучающего множества, то срабатывала либо одна из ПК(КК), либо срабатывали от одной до четырех (в зависимости от количества компонент, составляющих запах) ПК(МК); иногда не активировалась ни одна из ПК..

Изменение обучающего набора запахов приводило к изменению топологии активирующихся клеток. При этом варианты реагирования модели не изменялись. Анализ вариантов ответов модели на тестовые стимулы показал, что ПК(КК), срабатывают в том случае, когда тестовый стимул по компонентному составу и концентрациям компонент попадает в один из диапазонов, характерных для стимулов из обучающего множества. ПК(МК), срабатывают тогда, когда входной стимул не попадает по компонентному составу (сочетанию) или по соотношению концентрации компонент (оттенку) ни в один из диапазонов обучающего множества (то есть, стимул опознается моделью как незнакомый, новый). Ни одна ПК не активируется в том случае, когда подается стимул, состоящий из компонент, на которые не реагирует ни один из типов обонятельных рецепторных клеток модели (см. [7]). Отметим здесь, что нейроны ОЛ-сети (МК и КК) не активируются только в последнем варианте.

Для изучения способности модели к обучению опознавать "новые" стимулы виртуальной среды на вход подавался стимул такого компонентного состава, чтобы наблюдался второй вариант ответа, то есть чтобы активировались только ПК(МК). Затем подавалась активность от "эмоциональной системы", подтверждающая важность стимула для модели. Сразу после этого наблюдался рост аксонов от активированных КК в сторону ОК. После некоторого количества повторений данного входного стимула начинала активироваться, в ответ, одна из "молчавших" до этого ПК. При этом визуально наблюдалась на этой клетке конвергенция прорастающих аксонов. Теперь при подаче стимула, аналогичного по компонентному составу вновь запомненному, всегда отвечала новая ПК, а ПК(МК) прекращали через некоторое время работы модели активироваться в ответ на данный стимул – то есть, затормаживались формирующимися соответствующими тормозными связями. Таким образом модель переводила "незнакомый" новый стимул в разряд "знакомых".

Для оценки возможности тонкого различения однородных запахов (оттенков) виртуальной обонятельной среды был проведен следующий эксперимент с моделью. В серии опытов на вход модели подавался сложный стимул "abcdefghijklmn" при оптимальной "скорости потока воздуха". Компоненты стимула подбирались таким образом, чтобы возбуждались все типы обонятельных рецепторных клеток модели. На компоненты "a", "v" и "c" реагирует первый тип рецепторных клеток модели, на "f", "g", "h" – второй, на "i", "m" и "n" – третий; четвертый тип рецепторных клеток соответствует в модели параметру "скорость

потока воздуха". В каждой серии изменялась только концентрация компонент стимула. Всего предъявлено 27 сочетаний концентраций (то есть, 27 оттенков сложного однородного запаха). В ответ на каждое предъявление стимула регистрировалось возбуждение КК каждого модуля в ОЛ-сети и ПК в ОК-сети. Результаты эксперимента представлены в Таблице 1. Как видно из таблицы, в первом модуле активировались клетки КК<sub>1234</sub>, КК<sub>134</sub>, КК<sub>124</sub>, КК<sub>14</sub>, во втором – КК<sub>1234</sub>, КК<sub>234</sub>, КК<sub>124</sub>, КК<sub>24</sub>, в третьем – КК<sub>1234</sub>, КК<sub>134</sub>, КК<sub>234</sub>, КК<sub>34</sub>. Можно видеть, что каждая из этих клеток модуля соответствовала нескольким (от 3 до 11) оттенкам. В то же время, каждому из 27 оттенков входного стимула соответствовала активность только одной определенной ПК. Таким образом модель продемонстрировала способность к тонкому различению оттенков сложного запаха.

Проводилась оценка работоспособности модели при повреждении некоторых ПК. В этой серии экспериментов время предъявления обучающих стимулов увеличивали так, чтобы обеспечить формирование 3-4 дублирующих ПК, отвечающих на идентичные входные стимулы. Тестирование показало, что в этом случае при удалении какой-либо активирующей запахом ПК (в модели такая возможность предусмотрена) её заменяла клетка –дублер, при выводе из строя клетки-дублера её замещала следующая клетка-дублёр. Таким образом модель продемонстрировала высокую надежность работы при повреждении пирамидных клеток ОК.

С целью определения пороговых концентраций входных стимулов для пирамидных клеток ОК модели на вход подавался стимул "с" при оптимальной "скорости потока воздуха". При этом его концентрация постепенно понижалась. Фиксировали концентрацию, при которой соответствующая ПК прекращала активироваться. Затем аналогичные эксперименты проводились со стимулами "ch" и "chl", то есть, со стимулами, охватывающими два и три типа обонятельных рецепторных клеток. Эксперименты показали, что для "с" пороговая концентрация составляет 20% от оптимальной, для "ch" – 25,7%, для "chl" – 34,3%. То есть с увеличением сложности стимула пороговая концентрация растёт.

Оценивалась способность модели ОК "проявлять" психофизические феномены, характерные для обоняния, такие как слияние запахов, подавление слабого запаха сильным, изменение запаха при его длительном восприятии, при уменьшении концентрации запаха в целом или его отдельных компонент. Анализ показал, что ответ ПК пириформной коры был универсальным – происходила смена активированных ПК. Пример такой смены активированных ПК при уменьшении концентрации компоненты первой группы в предъявляемом стимуле представлен в Таблице 1: сначала активировалась ПК16, затем – ПК30, затем – ПК20. Кроме того, модель воспроизводит хорошо известный феномен привыкания к запаху (адаптация).

Проведено сравнение количества ПК пириформной коры, формирующихся в модели "путем прорастания" при предъявлении той части виртуальной среды, которая составляет обонятельную экологическую нишу модели, с тем количеством ПК, которое могло бы представлять все теоретически возможные запахи (и оттенки) виртуальной среды. В выборку запахов, составляющих виртуальную экологическую нишу, вошли четыре запаха (им соответствуют 4 типа рецепторных клеток и 4 МК в каждом модуле) и все сочетания из этих запахов (11) – все они представлены в каждом из трех модулей ОЛ-сети одноименными КК, а также 27 оттенков этих запахов – каждый из них представлен определенным сочетанием 3-х КК (по одной определенной КК из каждого модуля; они приведены в Таблице 1). При составлении оттенков учитывалось условие необходимости надпороговой концентрации компонент, входящих в область реагирования обонятельных рецепторных клеток. После обучения прорастанием сформировалась ОК-сеть, состоящая из 93 ПК, получающих входы от КК, и 10 ПК, получающих входы от МК. Таким образом оказалось, что для представления виртуальной экологической ниши в ОК достаточно 103 пирамидных клеток. В то же время, число всех теоретически возможных сочетаний из КК трех модулей модели много большее. Расчет, проведенный по известным формулам сочетаний из N элементов по "m", дал число 10112. Таким образом, сформированная в "онтогенезе" в строго экологической нише модель опознает 93 запаха (с оттенками); из остальных (10112-93=10019) теоретически возможных запахов каждый, будучи предъявленным, не опознаётся как целое (соответствующие ПК отсутствуют), но при этом в ОЛ-сети активируется соответствующее только ему определенное сочетание из КК трех модулей. Таким образом, ОЛ-сеть выступает для новых незнакомых запахов в виде своего рода калейдоскопа: все возможные картины в калейдоскопе могут быть видимы (воспринимаются, ощущаются), однако, практически каждая из них не опознается как "знакомое целое", то есть, имеет место феномен "вижу, но не опознаю".

Для опознания этих незнакомых запахов, как знакомых единиц необходимо, чтобы были дополнительно сформированы в ОК новые ПК, соответствующие этим картинам как целым единицам.

Авторы находят в выше приведенной трактовке феномена "вижу, но не опознаю", (проявляемого и другими сенсорными системами) решение "проблемы комбинаторного взрыва". В то же время, в связи с таким пониманием работы обонятельной системы, возникает интригующий вопрос, не имеющий пока ответа, каким образом мозг "ищейки" мгновенно запоминает новый незнакомый запах и затем опознает его в последующих пробах воздуха. По-видимому, этот процесс должен обеспечиваться в основном механизмами кратковременной памяти и содержать компараторную составляющую.

Таблица 1. Опознание сложного запаха при изменении концентраций компонентов сложного запаха

Концентрация компонентов входного стимула относительно типов обонятельных рецепторов				Активированные кисточковые клетки ОЛ			Активированные пирамидные клетки №№
Типы рецепторов				Модуль I	Модуль II	Модуль III	
1	2	3	4				
В	В	В	В	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>1234</sub>	ПК16
В	С	В	В	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК67
В	Н	В	В	КК <sub>134</sub>	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК27
С	В	В	В	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>1234</sub>	ПК30
С	С	В	В	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК43
С	Н	В	В	КК <sub>134</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК8
Н	В	В	В	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>234</sub>	ПК20
Н	С	В	В	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>34</sub>	ПК26
Н	Н	В	В	КК <sub>134</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>34</sub>	ПК12
В	В	С	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>1234</sub>	ПК37
В	С	С	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК14
В	Н	С	В	КК <sub>14</sub>	КК <sub>1234</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК64
С	В	С	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>1234</sub>	ПК23
С	С	С	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК1
С	Н	С	В	КК <sub>14</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК32
Н	В	С	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>234</sub>	ПК38
Н	С	С	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>34</sub>	ПК42
Н	Н	С	В	КК <sub>14</sub>	КК <sub>234</sub>	КК <sub>34</sub>	ПК5
В	В	Н	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>124</sub>	КК <sub>1234</sub>	ПК15
В	С	Н	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>124</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК19
В	Н	Н	В	КК <sub>14</sub>	КК <sub>124</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК29
С	В	Н	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>24</sub>	КК <sub>1234</sub>	ПК18
С	С	Н	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>24</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК28
С	Н	Н	В	КК <sub>14</sub>	КК <sub>24</sub>	КК <sub>134</sub>	ПК57
Н	В	Н	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>24</sub>	КК <sub>234</sub>	ПК4
Н	С	Н	В	КК <sub>124</sub>	КК <sub>24</sub>	КК <sub>34</sub>	ПК22
Н	Н	Н	В	КК <sub>14</sub>	КК <sub>24</sub>	КК <sub>34</sub>	ПК31

Примечание. В – высокая концентрация, С – средняя концентрация, Н – низкая концентрация.

## Литература

- [1] Воронков Г.С., Изотов В.А. Компьютерное моделирование обработки информации в обонятельной системе. I. Модель структурно-функциональной организации нейронных элементов обонятельной луковицы и рецепторного эпителия. // Биофизика. 2001. Т. 46, вып.4. С. 696-703.
- [2] Воронков Г.С., Изотов В.А. Компьютерное моделирование обработки информации в обонятельной системе. II. Механизмы опознания и кратковременного запоминания в обонятельной луковице: результаты компьютерного экспериментирования. // Биофизика. 2001. Т. 46, вып. 4. С. 704-708.

- [3] Изотов В.А., Воронков Г.С. Компьютерное моделирование обработки информации в обонятельной системе. III. Воспроизведение психофизических феноменов компьютерной моделью обонятельной луковицы. // Биофизика. 2002. Т. 47, вып. 5. С. 914-919.
- [4] Воронков Г.С. Сенсорная система как нейронная семиотическая модель адекватной среды. // Сб.: Сравнительная физиология высшей нервной деятельности человека и животных. М. Наука, 1990, С. 9-21.
- [5] Воронков Г.С. Модельный подход как новая парадигма в теории связи в сенсорных системах.// Вестн. моск. ун-та. Сер.16. Биология, 1993, вып. 1, С. 3-10.
- [6] Воронков Г. С. Мозг и информация. // Научная сессия МИФИ-2002. Нейроинформатика-2002. Материалы дискуссии. Москва 2003, С. 137-147; [www.biolog.ru/vnd](http://www.biolog.ru/vnd)
- [7] Гладун В.П. Партнерство с компьютером. "Port-Royal", Киев, 2000, с. 119.
- [8] Изотов В. А., Воронков Г.С. Организация входного воздействия при компьютерном моделировании обонятельной системы. // Биофизика. 1999. Т. 44, вып. 1. С. 120-122.
- [9] Воронков Г.С. Нейроморфология обонятельных путей млекопитающих. // Ж. эвол. биохим. и физиол., 1994, Т.30, № 3, С. 432-454.
- [10] Нейроонтогенез. Под ред. Мицкевича М.С. –М. Наука, 1985, 270 с.
- [11] Wilson D.A., Sullivan R.M. Sensory physiology of central olfactory pathways. For: Handbook of Olfaction and Gustation (Second Edition) R. Doty, Editor, M. Dekker, Inc, New York, 2001, pp.1-49.

---

### Информация об авторах

---

**Геннадий С. Воронков** – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119992, Москва, Россия, Ленинские Горы, Россия; e-mail: [gsv@comtv.ru](mailto:gsv@comtv.ru)

**Владимир А. Изотов** – Костромской государственный технологический университет, 156021, Кострома, ул. Дзержинского, 17, Россия; e-mail: [vlizotov@yandex.ru](mailto:vlizotov@yandex.ru)

## MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING AND RESEARCH OF COGNITIVE PROCESSES IN HUMAN BRAIN. PART I. SYSTEM COMPOSITIONAL APPROACH TO MODELLING AND RESEARCH OF NATURAL HIERARCHICAL NEURON NETWORKS. DEVELOPMENT OF COMPUTER TOOLS

**Yuriy A. Byelov, Sergiy V. Tkachuk, Roman V. Iamborak**

**Abstract:** *System compositional approach to modelling and research of informational processes, which take place in biological hierarchical neuron networks, is being discussed. A number of computer tools have been successfully developed for solution of tasks from this domain. A raw of computational experiments, investigating the work of these tools for olfactory bulb model, has been conducted. The common-known psycho-physical phenomena have been reproduced in experiments.*

**Keywords:** *system compositional approach, mathematical and computer modelling, elementary sensorium, hierarchical neuron networks, computer tools, olfactory bulb.*

---

### Introduction

---

Physics, mathematics and modern computer sciences are universally recognized instruments for research of complex processes and phenomena of the real world. In addition to traditional research domains of these sciences more and more disciplines are being involved into their sphere of interest. In scientific literature dedicated to interdisciplinary research the expression "mathematical and/or computer model" occupies the most prominent place.

Recently a lot of scientific researches have been conducted, where those phenomena and processes are investigated, which have never been involved into the sphere of physico-mathematical and computer applications. The tendency to formalization appears especially in those knowledge domains, where a direct experiment giving the possibility to collect reasonably complete and objective information about the reality under research is practically impossible. It is commonly known that e.g. neuron sciences occupy one of the leading places in modern biology by the number of physicians, mathematicians and computer science specialists involved, competing with molecular biology, genetics and biotechnologies. While by complexity of appearing interdisciplinary problems neuron sciences even leave others behind.

Fast accumulation of enormous amount of experimental data, especially in the last decades of twentieth century and the beginning of a new century prepared a foundation for trying to develop (on a basis of modern imaginations and possibilities) a new concept concerning the natural mechanisms of recognition, memory and purposeful thinking. Also alternative approaches exist, which are dictated by queries of both fundamental and modern practical medicine and by search of new non-traditional ways of "intellectual" technics creation.

The idea, that theoretical constructions can appear only on a basis of wide experimental material reflecting the subject under investigation completely, is still popular in the scientific society. However, the history of natural science from one hand does not prove this concept, and from the other hand numerous examples urge as to think, that the motivating incentive for development and creation of a new concept is usually a limited set of fundamental facts. Though, the experiment without any doubts feeds theoretical constructions and serves as a foundation for a future theory. It is worth to underline, that similarly to the theory, which is supported with experimental facts, the experiment carries useful information only if it is being conducted according to a specific theoretical concept.

In the present paper we are interested with questions of mathematical modelling and research of cognitive processes inside the human brain. For this matter computer tools are introduced and discussed. While being created, they were oriented first of all to networks with complex architecture, namely non-linear hierarchical neuron networks of interacting neurons and neuron assemblies (which are created in turn from simpler neuron networks), generally speaking, with taking into account energy dissipation. The last circumstance, as it is known, lets us to respect and model very important aspects affiliated with self-organization. It is worth to underline that we will research and model multilevel hierarchical neuron networks with forward (ascending, aggregating), backward (descending, decomposition) and circular (parallel, positive and negative) connections. At that we will operate with so-called typical structures, from which, probably, the complex brain-like structures (e.g. memory), generally speaking, of large dimension are constructed. We hope that developed in cooperation with our colleagues [1,2] approach will help to achieve deeper understanding of human's nature and brain activity. Need for research and modelling of such neuron networks with complex architecture appears when solving the tasks of multilevel information processing inside the brain and for computer modelling, complex behavior, decision making, etc.

At the present moment we ought to ascertain, that existing experimental data and imaginations concerning the neuron activity characteristics and interaction principles have not yet led to complete understanding of such information processing procedures as memorization, recognition, thinking, etc., inside the brain. The mechanisms concerning the functioning of attention, distinction of unconscious and conscious psychical processes, impact of emotions, etc. are still not explained.

---

### **Mathematical Model of Elementary Sensorium: Basic Notions**

---

Under the *neuron model* of sensorium we will further understand a model, consisting of neurons and synapses, which incorporate a complex hierarchical network structure (generally speaking, of high dimension) of interacting neurons and neuron assemblies. *Synapse* will be regarded as a connection between two *neurons*. Neurons and synapses will be considered atomic.

Neurons are connected with each other by means of synapses. In turn, synapses and neurons are connected with pre- and postsynaptic *membranes*. If a pathway of a signal transmission is from a neuron to synapse, then the membrane is called *presynaptic*, if a signal is transmitted in opposite direction, then the membrane is called *postsynaptic*.

Regard the representation of sensory (non-verbal) information inside the brain. Let's consider, taking into account [3], that:

1. there is a model of outside world in the brain (neuron engram);
2. information about sensory environment is transmitted into the brain being encrypted by sensory systems;
3. the model of sensory environment is represented with sensory systems with their over-modal level (neuron model);
4. basic units of neuron system, neurons, correspond to the objects of outside environment;
5. objects of sensory environment effect the neuron model;
6. changes inside the model – “informational processes inside the sensory brain part”

### The Main Basic Elements and Compositions of the Model of Elementary Sensorium

Let us pay more attention to the discussion of the main basic notions and elements as well as of the compositions of the model of elementary sensorium.

The model consists of *synaptic levels* (SL). There are *symbol* and *quasi-symbol neurons* (SN and QSN) on every synaptic level, which form respectively *symbol* and *quasi-symbol fields*. The main difference between symbol and quasi-symbol neurons is in what functions they perform and how their activity is being interpreted, though both have a similar structure. Symbol neurons correspond to a particular object as a whole. Those quasi-symbol neurons, which are connected by positive backward links with some symbol neuron, represent properties of separate object, to which the symbol neuron corresponds. On a higher hierarchical level they are located, a more complex object (and its more complex properties) they represent [2]. Symbol and quasi-symbol neurons in aggregate will be defined as *principal*.

Let us define symbol neurons SL-0 as *receptors*. It is possible, that on every level both symbol and quasi-symbol neurons exist. The only exception from this rule is SL-0 – the level of receptor neurons. This particular level does not contain quasi-symbol neurons. Receptor neurons correspond to indecomposable elementary objects, by which the system of generative properties of high-order symbol neurons SL is defined. Receptors are symbol neurons themselves.

Let us distinguish separately quasi-symbol neurons SL-1. They will be defined as quasi-receptor neurons, as long as they duplicate receptor neurons [2]. The set of quasi-receptor neurons will be denoted as *quasi-receptor field*.

Inside the model symbol and quasi-symbol neurons are organized into *basic structures* (BS), which form a hierarchical neuron network. The notion of basic structure is introduced based on neuron structures defined in [2-3]. Every basic structure is defined by some symbol neuron, which is located, for determinacy, on SL- $i$ . This neuron will be defined as *determinative* for BS. BS consists of the determinative neuron  $N$  itself, the set of quasi-symbol neurons  $K_i$  on SL- $i$ , which have positive forward and backward connections with SN  $N$ , the set of symbol neurons  $S_{i-1}$  from SL-  $i-1$ , whose axons converge into the determinative for BS symbol neuron. Also all synapses and inserted neurons, by which a connection between  $N$  and  $K_i$ ,  $N$  and  $S_{i-1}$ ,  $K_i$  and  $S_{i-1}$  is realized, belong to the basic structure. Aforementioned basic structure will be defined as BS corresponding to the neuron  $N$ .

It is worth to underline, that the neuron network, which is not provided with mechanisms for new BS creation, cannot be trained for recognition of new objects. It is capable to recognize only those objects, for which corresponding symbol neurons exist.

Further the principal parts of basic structures' components will be defined.

Let us consider the  $i$ -th synaptic level. A *symbol group* corresponds to each SN. Let us define the symbol group of the determinative neuron of the  $i$ -th synaptic level as a part of corresponding BS, which consists of quasi-symbol neurons, synapses, inserted neurons and synapses, which belong to the  $i$ -th synaptic level and mediate connections between the symbol neuron and corresponding to it quasi-symbol neurons. It is worth to stress, that the connections of the symbol neuron with other symbol neurons from the same SL are not included here.

Let us define a notion of *converging group* for the symbol neuron  $N$  from SL- $i$ . This group is formed with symbol neurons from SL-  $i-1$ , which alter, most often indirectly via synapses and inserted neurons, the state of  $N$  (i.e. alter its membrane potential), and also with all intermediate neurons and synapses, i.e. neurons whose exit signals are entrance signals for  $N$ . Note, that even though this influence can be mediated with other neurons, it cannot be mediated with other principal neurons.

A notion of type of the neuron and single-type neurons is very important. Non-formally, the neurons are single-type neurons if they react to equal by quality entrance incentives. Let us introduce formal notions. Let us define a notion of *type of a neuron* for symbol neurons. On SL-0 the types of neurons are given as initial characteristics of the network and are taken from some set of elementary types. This set will be denoted as  $RT$ . For SL- $i$  ( $i \geq 1$ ) the notion is given inductively. Let us consider the symbol neuron  $N$  from SL- $i$ . Let the symbol neurons from the converging group of neuron  $N$  have types  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . Then the type of neuron  $N$  by definition is  $\{t_1 \cup t_2 \cup \dots \cup t_n\}$ . The type of quasi-symbol neuron is defined with the types of symbol neurons, whose exit signals are entrance signals for the considered quasi-symbol neuron. It is worth to underline, that inside the model the types of these neurons coincide. Two neurons are *single-type neurons*, if their types coincide. Obviously the *uniformity relation of neurons* is equivalence relation.

Based on the paper [4] as well as on papers [1,2] for more precise modelling it is worth to take into account, that before the impulses of single-type symbol neurons reach the target symbol neuron from the next level, the initial signals will undergo some modifications, while passing through the inserted neurons and the raw of synapses. At the same time, the signals from single-type neurons are capable to interact independently on the signals of neurons of other types. As a result a notion of *uniform converging group* will be introduced. Its definition is just the same as one of converging group with a single difference, that uniform converging group comprises those and only those neurons of converging group from SL- $i-1$ , which are single-type neurons. Consequently, for the symbol neuron its converging group is decomposable into a set of uniform converging groups. It is worth to say, that there is a particular set of synapses and neurons, by which the uniform converging groups interact. At the same time these neurons and synapses are not themselves included into any uniform converging group.

A *projective group* of quasi-symbol neuron  $N$  from SL- $i$  is a set of neurons and synapses, which consists of quasi-symbol neuron  $N$ , single-type symbol neurons from SL- $i-1$ , whose exits are entrances of  $N$ , and also synapses and inserted neurons, by which these connections are mediated.

A *descending group* of quasi-symbol neuron  $N_k$  from SL- $i$  is formed with neuron  $N_k$  itself, all quasi-symbol neurons from SL- $i-1$  accepting the input (possible indirectly) from  $N_k$  without intermediate principal neurons, and also all intermediate neurons and synapses (if any). Note, that descending groups appear for neurons on SL- $i$  for  $i \geq 2$ , as long as quasi-symbol neurons appear starting from SL-1.

A *horizontal pair* of symbol neuron  $N_s$  from SL- $i$  is a neuron  $N_s'$  from SL- $i$ ,  $N_s$  itself, to which a signal is passed from  $N_s'$  without other intermediate principal neurons. All synapses and inserted neurons, through which the signal is passed from  $N_s'$  to  $N_s$  belong to horizontal pair as well. A notion of *horizontal co-pair* is analogical to one of horizontal pair with a single difference that  $N$  is not a receptor but a source of a signal.

A *horizontal group* of symbol neuron  $N$  is a union of all its horizontal pairs.

A *horizontal co-group* of symbol neuron  $N$  is a union of all its horizontal co-pairs.

### Basic Properties of Notions Introduced for Elementary Sensorium

Taking into account neuro-physiological data [4] particular relations should hold between uniform converging groups, projective groups and symbol group. Let us define them formally. Consider a symbol neuron  $N_s$  from SL- $i$ . Let  $N_k$  be a quasi-symbol neuron, which belongs to a symbol group of neuron  $N_s$ . By definition for aforementioned notations the following condition hold:

UCP1. Let  $n_1, n_2, \dots, n_p$  be a set  $S$  of all symbol neurons, which are included into projective group of quasi-symbol neuron  $N_k$  on SL- $i$ . Then  $S$  coincides with a set of all neurons SL- $i-1$ , which belong to a particular uniform converging group of the symbol neuron  $N_s$ . At the same time  $N_k$  is included into the symbol group of  $N_s$ . The opposite assertion holds as well. The set of symbol neurons  $S$  from SL- $i-1$  of some uniform converging group  $N_s$  coincides with a set of symbol neurons, for which such quasi-symbol neuron  $N_k'$  exists, that  $S$  is a set of symbol neurons of the projective group  $N_k'$ , while  $N_k'$  itself belongs to the symbol group of  $N_s$ . A projective group with a set of symbol neurons  $S$  and a uniform converging group with a set of symbol neurons  $S$  on SL- $i-1$  will be defined as *corresponding*.

UCP2. Vertebrates have the following property for some sensory systems, in particular for olfactory system [4]: often in the corresponding uniform converging and projective groups intermediate elements between the set  $S$

and target symbol and quasi-symbol neurons are equal. Only the neuron sprouts, diverging at the exit, are different. Some of them enter the symbol neuron, others – quasi-symbol. Further such corresponding groups will be referenced as *adjacent*. Note, that inside the olfactory bulb (OB) exactly the adjacent projective and uniform converging groups take place.

Let us specify a property, which connects uniform converging and descending groups (UCD1). Let two single-type symbol neurons  $N_s^1$  and  $N_s^2$  from SL- $i-1$  belong to the converging group of the symbol neuron  $N_s$  from SL- $i$ . These neurons belong to the same projective group of some quasi-symbol neuron  $N_k$  (see UCP1). Let quasi-symbol neurons  $N_{k,1}^1, \dots, N_{k,m}^1$  and  $N_{k,1}^2, \dots, N_{k,n}^2$  (and only they) belong to symbol groups  $N_s^1$  and  $N_s^2$ . Then these neurons belong to the descending group of the quasi-symbol neuron  $N_k$ . Let us define the part of descending group of neuron  $N_k$ , which consists of quasi-symbol neurons  $N_{k,1}^1, \dots, N_{k,m}^1$  and intermediate synapses and neurons, by which  $N_{k,1}^1, \dots, N_{k,m}^1$  are connected with  $N_k$ , as *descending symbol subgroup* of the descending group of quasi-symbol neuron  $N_k$ , corresponding to the symbol neuron  $N_s$ . Defined property is a generalization of some results from the paper [4].

### Correspondence of the Sensorium's Conceptual Basis for the Olfactory Bulb

Let us give a description of the symbol group presenting in the neuron network described in [4]. Tufted cell (TC) represents a symbol neuron. Mitral cells (MC), which correspond to TC, represent the quasi-symbol neurons, while signal transmission is mediated with a granule cell.

Converging group cannot be described with a simplest case in the OB. Synaptic connections; so-called olfactory zones (OZ) are located between receptors (SL-0) and tufted and mitral cells (SL-1). They interact via inter-glomerular cells. Also inside OZ a pre-synaptic inhibition takes place. I.e. in general the converging groups on SL-1 inside OB are much more complex than the simplest case. This is a description of the converging group inside OB on SL-1 for the tufted cell [4].

Inside OB the uniform converging groups are strictly described – there are tufted cell  $N_s$ , some OZ and also all receptive neurons, whose axons are connected with this OZ. There are also some additional connections between different OZ, which belong to the converging group  $N_s$  - this interaction takes place via inter-glomerular cells. Thus, this fact reveals additional connections between uniform converging groups, which were mentioned above [4].

Regard the horizontal groups and co-groups presenting in OB [4]. High order tufted cells influence low order tufted cells via vertical short-axon cells. Hence, high order tufted cell together with some vertical short-axon cell and synapses between them forms a horizontal pair with tufted cell of low order, which has synapses with corresponding vertical short-axon cell. In turn tufted cells of low order form co-pairs with high order tufted cells. Analogically tufted cells of the same order influence each other via the horizontal short-axon cells [4]. Here also pairs and co-pairs exist, which in turn are parts of groups and co-groups.

The common part of adjacent projective and uniform converging groups is represented inside OB with olfactory zones – they represent the common part, which is specified in the definition of adjacent groups [4].

---

### Description of Tools for Biological Neuron Networks Modelling

---

The tools are represented with software, which takes as input data a neuron network and its inputs declared in XML language [5]. The input neuron network is given with oriented graph.

**Oriented Graph of Neuron Network. Vertices and Edges.** The first stage of the neuron network construction is specification of vertices. Vertices are intended to define specific points inside the model. Under “specific points” we understand locations of the neuron network, where some signal transformation, as a rule nonlinear, takes place. During the modelling these locations with sufficient precision can be substituted with a single point, i.e. vertex. The examples of specific points are pre-synaptic and post-synaptic membranes, axon hills, etc. The edges

of the graph define the direction of signal transmission. They have such attributes as type, length, and coefficient of signal amplification/decrease.

### Neurons and Synapses

To specify the network in a more informative way the basic types of biological neuron network elements are distinguished. Also with their help the way, how to pass signals through the edges, is defined. In a graph, this represents a neuron network, neurons and synapses represent its sub-graphs, every edge belonging to a single network element, neuron or synapse (Fig. 1). Some vertices can belong simultaneously to both neuron and synapse. In this case vertices model either pre- or postsynaptic membranes. Some vertices inside the neuron network are entrance vertices. They correspond to the endings of dendrites of receptor neurons in Natural Neural Network (NNN). For each entrance vertex the input signal is given as a set of pairs (moment of time, level of signal).

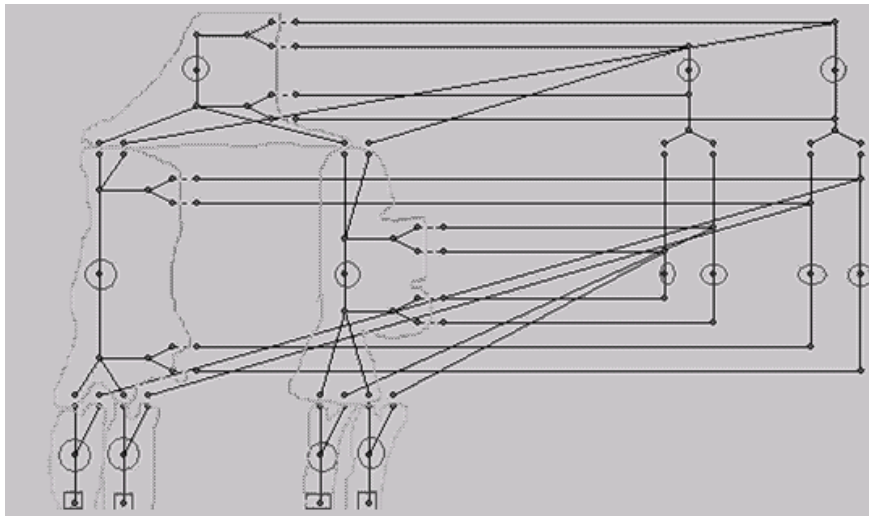


Fig. 1 Example of neuron network model in computer tools.

For clearness some neurons are rounded with curves. Entrance vertices are marked with squares.

Vertices, where generation of action potential takes place, are marked with circles.

If the level of signal is needed for a particular moment of time, which is not specified in input, the signal is calculated as a result of linear interpolation. At the same time, the enquired moment of time should be located between the minimal and maximal moments given in input. All vertices are also exit vertices, i.e. it is possible to obtain the exit signal from them in any particular moment of time.

The design of data structure for neuron network vertex description provides a possibility to store the history of signal behavior inside the vertex, which enables to analyze the signal changes inside the vertex during experiment. Upon completion of simulation of the network behavior the tools enable to monitor the history of every vertex.

**Time Inside the Model.** Time inside the model is discrete, tools enabling to define the discretization interval. In workflow the signal level is recalculated in each point for every discrete moment of time.

**Input Data Inside the Model.** During simulation of aforementioned processes, which take place inside the neuron network, there is a possibility of real-time visual representation of signal level in any vertex in every discrete moment of time. The more intensive signal level is in the vertex in particular moment of time, the bigger is a circle diameter with a center in this vertex. Also it is possible to view a chart of signal level dynamics in any point upon the modelling completion. It is possible to visualize a summary signal level of a particular neuron.

**Input Data Representation.** The input data is being read from XML-document, where the neuron network structure is defined. Let us refer to three main elements of this document.

1. *ports* – vertex description. Each vertex is defined with a title, unique identifier, 2D coordinates, type (regular vertex or, so-called, generator of action potential (AP), see below). For AP generators the number of vertex (which stores AP sample), a threshold signal level, coefficients of length and amplitude increment relatively to the sample is defined. Also a non-obligatory parameter for every vertex is a list, which defines a signal level, as a rule, of entrance activity by means of pairs <moment of time, the signal level in a vertex in this moment of time>.

2. *synapses* – signals description. The main characteristics for synapse are its class (chemical or electrical), type and the list of edges. Every edge is defined with an ordered pair of vertex numbers, length and weight. Note, that the notions of length and transmission time are similar in tools. In the simplest case synapse consists of two vertices, which correspond to pre- and postsynaptic membranes, and one edge, which corresponds to synaptic chink connecting two vertices. Thanks to facilities presented in tools there is a possibility to use several edges for more adequate synapse description.

3. *neurons* – neuron description. Each neuron has a particular type. At the moment there is only one neuron type implemented in tools – simple neuron. Similar to synapse, neuron has a list of edges, the order of which is just the same as the order of edges in synapses.

Entrance receptor signals of the neuron network are also defined in XML-document, which consists of a list of elements. Each element defines a signal for one of the entrance vertices as a list of pairs, which specify the level of entrance signal in a particular moment of time.

**Signal Values Calculation.** Each vertex of the network is characterized with definite condition in any moment of discrete time  $\Delta t \cdot i$ , where  $i \in [0..n]$ ,  $\Delta t$  – discretization interval. Condition is defined with a current signal level of the vertex, in which stage the action potential is and with other parameters depending on the type of the vertex. The network condition in the current moment of time  $\Delta t \cdot (i + 1)$  is defined with conditions of vertices in the network graph.

Let us define a signal processing, which takes place in the vertices. Two types of vertices are used in tools: *simple vertices* and *AP generators*. Signal values are defined on entrances of simple vertices in discrete moments of time. Linear spline is constructed based on these points. It can be used for exit signal value calculation in any moment of time. AP generators have more complex behavior. Dependency of the exit signal from the entrance signal is just the same as in previous item. The exception, however, is in the following. If signal power reaches the critical level of depolarization and in this moment the vertex is not in condition of refractor period, then the action potential with predefined parameters is generated. The type of action potential of the vertex is determined based on the sample taken from [6, p.27-54], given with a list of pairs of coordinates – dependency of membrane potential from time. In every moment of discrete time for every vertex the values of all adjacent vertices are being corrected, taking into account to which object this vertex belongs.

Edges in simple neuron have such characteristics as length and coefficient of signal change, i.e. the signal while passing through the edge is being processed with linear transformation. We stress on simple neuron (not on just neuron) to underline the flexibility and extensibility of tools. With a time-flow signals change in vertices depending

on their edge connections with other vertices:  $v_j(t) = \sum_{e \in I} v_{s(e)}(t - l_e) \cdot c_e$ , where generally  $v_k(t)$  - the signal

value in the vertex  $k$  in the moment of time  $t$ ,  $I$  - set of edges entering the vertex  $j$ ,  $l_e$  - the time of signal transmission through the edge  $e$ ,  $s(e)$  - the beginning of the edge  $e$ ,  $c_e$  - weight coefficient of the edge  $e$ . Note, that this transformation is inherent for all vertices and is the first transformation, which can be followed with specific transformations related for every particular type of vertex.

In most simple implementations of synapse models the signals are transmitted in a similar for edges way with exceptions in regions, where mechanisms of plasticity are represented. Plasticity is fulfilled with change of the coefficient of signal transmission in synapse according to the following rule:

$$c_{ij}^1 = \begin{cases} c_{ij}^0 \cdot \lambda_{inc}, & v_j(t + l_{ij}) \geq v_n \\ c_{ij}^0 \cdot \lambda_{dec}, & v_j(t + l_{ij}) < v_n \end{cases} \quad \text{where } c_{ij}^0 - \text{current coefficient of signal transmission, weight coefficient of a}$$

synapse,  $c_{ij}^1$  - new coefficient of signal transmission while passing through the edge  $(i, j)$ ,  $v_j(t + l_{ij})$  - signal level in the vertex  $j$  in the moment of time  $t + l_{ij}$ ,  $\lambda_{inc}$  - coefficient of increase,  $\lambda_{dec}$  - coefficient of synapse

weight decrease,  $v_n$  - constant, which specifies a border between the increase and decrease of weight coefficient of a synapse. For more precise modelling a more complex synapse type is implemented, where the signal is described with integral transformation:

$$v_j(t + l_{ij}) = c_{ij} \int_{t-\Delta t}^t v_i(\tau) \cdot e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau, \text{ where } v_i(\tau) - \text{signal level in the vertex } i \text{ in the moment of time } \tau,$$

$v_j(t + l_{ij})$  - signal level of the vertex  $j$  at the moment of time  $t + l_{ij}$ ,  $l_{ij}$  - time of signal transmission through the edge  $(i, j)$ ,  $c_{ij}$  - weight coefficient of an edge,  $\Delta t$  - time interval, which is taken into account during the exit signal calculation,  $\lambda > 0$  - parameter defining signal extinction. In such synapses signal level on post-synaptic membrane at the moment of time  $t + l_{ij}$  depends on the level of signal on pre-synaptic membrane during the time period  $[t - \Delta t, t]$ . Thus, during the calculation of the current state for a particular network vertex not only one previous state is taken into account, but all network states, which appeared during a whole period of time. Consequently, more precise modelling results are obtained. For each neuron the summary level of signal at the moment of time  $t$  is calculated as a sum of signals of all edges of the neuron, where signal of the edge  $s_{ij}$  is

calculated as  $s_{ij}(t) = \int_0^{l_{ij}} v(\lambda) d\lambda \approx \sum_{k=0}^{[l_{ij}/\Delta l]} v(\Delta l \cdot k) \Delta l$ , where  $\Delta l$  - step of discretization of numerical integration,  $v(\Delta l \cdot k)$  - the level of signal at the distance  $\Delta l \cdot k$  from the beginning of the edge,  $l_{ij}$  - length of the edge  $(i, j)$ .

---

### Verification of Correspondence of Tools for Olfactory Bulb Model

---

In this section the testing of tools' functionality for olfactory bulb model [4] is described. Testing has been performed on the precisely described in [4] neuron network. Experiments for OB phenomena [7-8] proof have been tried.

The neuron network of olfactory bulb constructed with use of experimental data based on [4], in major follows the basic concept. Aforementioned programming environment has been used for olfactory bulb modelling. Parameters of OB model are given in XML language.

Entrances are represented with four vertices, i.e. four types of receptors were examined in model, which react differently on complex scents in adequate scent environment [4]. Let us introduce the results of conducted experiments. Signals to the entrances 1-3 of groups during experiments 2-3 have been passed with conditional time intervals 0-5 and 10-15. To the last exit corresponding to mechano-receptors during experiments 1-3 the signal has been passed continuously. Let us describe conducted experiment and obtained results with more details.

**Testing of Mechano-receptors.** Pure air has been passed to entrance. Consequently only one mitral cell has been excited. Other principal neurons have not generated action potentials.

**Recognition of Complex Signal.** Incentives a, b, c, d have been passed in concentration, which is enough for excitation [4]. MC1 and TC14 have reached excitation. Cells MC1 and TC14 have generated AP. The rest of tufted cells have not been activated with exception of TC124, which has given a faint response during scent recognition.

**Recognition of Full Odorant Spectrum.** A full spectrum of incentives has been passed to entrances. All receptors have been in excitation. Consequently, all mitral cells and almost all tufted cells have also been excited. However with a time-flow all of them have been triggered with TC1234.

**Excitation of Principal Neurons not Connected with Mechano-receptors.** In condition of low air speed complex scents TC12, TC13, TC123, and TC23 are able to distribute themselves. A component affiliated with

airflow is absent in them. This happens only given that air speed is low – faint level of signal at the entrance of mechano-receptors in compare to other types of receptors.

**Synaptic Plasticity.** We have implemented plasticity of synapses, which are connected with principal neurons. Taking into account computer simulation it is possible to conclude, that aforementioned modification of synapses based on the modelling of plasticity mechanisms leads to the following fact. During repeated passing of inputs to receptors the reaction of corresponding mitral and tufted cells increases in sequence of generated action potentials and in duration of rhythmic activity. This evidences, that synaptic plasticity is an important component of short-term memory.

We succeeded to reproduce all phenomena, which were planed during experimentation. This proves the correspondence of tools to commonly known morphological, electro-physiological and psychological data.

---

## Conclusions

A system compositional approach to mathematical and computer modelling of the particular type of natural hierarchical neuron networks is discussed. Primary basic components and compositions of the model of elementary sensorium are described. Also basic properties of introduced definitions and notions are specified.

Computer tools for modelling of informational processes in biological hierarchical neuron networks are developed.

A series of computing experiments concerning the functioning of tools with a model of olfactory bulb was conducted, where common-known psycho-physical phenomena are reproduced.

---

## Bibliography

- [1] Z.L.Rabinovich. About mechanisms of thinking and intellectual computers // *Cybernetics and system analysis*, 1993, #3, p.63-78
- [2] Z.L.Rabinovich, G.S.Voronkov. Representation and processing of knowledge in interaction of human sensory and language neuron systems // *Cybernetics and system analysis*, 1998, #2, p.3-12
- [3] G.S.Voronkov. Information and brain: the sight of neuro-physiologist // *Neuron computers: development, application*. # 1-2, 2002, p.79-86
- [4] G.S.Voronkov, V.A.Izotov. Computer modelling of information processing mechanisms in olfactory system. I. Model of structural and functional organization of olfactory bulb elements and receptor epithelium // *Biophysics*. 2001, vol. 46, prod. 4, p.696-703
- [5] M.Graves. *Designing XML Databases*. Moscow: Williams, 2002, 640p.
- [6] R.Schmidt and others. *Human physiology: 3 volumes*, vol. 1, Moscow: Mir, 1996, 323p.
- [7] G.S.Voronkov, V.A.Izotov. Computer modelling of information processing mechanisms in olfactory system. II. Mechanisms of recognition and short-term memory in olfactory bulb: results of computer simulation // *Biophysics*. 2001, vol. 46, prod. 4, p.704-708.
- [8] G.S.Voronkov, V.A.Izotov. Computer modelling of information processing mechanisms in olfactory system. III. Reproduction of psycho-physical phenomena with olfactory bulb model // *Biophysics*. 2002, vol. 46, prod. 5, p.914-919.

---

## Authors' Information

**Yuriy A. Byelov** – professor, doctor of physical-mathematical sciences, Taras Shevchenko National University in Kyiv, Ukraine, 03680, Kyiv - 680, Academician Glushkov Avenue 2, building 6, e-mail: [belov@ukrnet.net](mailto:belov@ukrnet.net)

**Sergiy V. Tkachuk** – post-graduate student, Taras Shevchenko National University in Kyiv, Ukraine, 03680, Kyiv - 680, Academician Glushkov avenue 2, building 6, e-mail: [tksergiy@gmail.com](mailto:tksergiy@gmail.com)

**Roman V. Iamborak** – post-graduate student, Taras Shevchenko National University in Kyiv, Ukraine, 03680, Kyiv - 680, Academician Glushkov Avenue 2, building 6, e-mail: [yambor@ukrpost.net](mailto:yambor@ukrpost.net)

**MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING AND RESEARCH  
OF COGNITIVE PROCESSES IN HUMAN BRAIN.  
PART II. APPLYING OF COMPUTER TOOLBOX TO MODELLING OF PERCEPTION  
AND RECOGNITION OF MENTAL PATTERN  
BY THE EXAMPLE OF ODOR INFORMATION PROCESSING**

**Yuriy A. Byelov, Sergiy V. Tkachuk, Roman V. Iamborak**

**Abstract:** Results of numerical experiments are introduced. Experiments were carried out by computer simulation on olfactory bulb for the purpose of checking of thinking mechanisms conceptual model, introduced in [1]. Key role of quasisymbol neurons in processes of pattern identification, existence of mental view, functions of cyclic connections between symbol and quasisymbol neurons as short-term memory, important role of synaptic plasticity in learning processes are confirmed numerically. Correctness of fundamental ideas put to base of conceptual model is confirmed on olfactory bulb at quantitative level.

**Keywords:** thinking phenomena, olfactory bulb, numerical experimentation, model, neuronal network.

---

## Introduction

---

More and more papers are dedicated to modelling of brain activity and thinking processes in particular lately. Because of the great complexity of research object, construction of conception, which doesn't conflict with wide variety of experimental data and conforms to known psychological and psychophysical phenomena, is hard enough. One of few such conceptions is conceptual model described in [1]. This one is used as a base in this paper.

Authors of [1] have carried out qualitative analyses of described conceptual model and haven't found contradictions with experimental materials. That is why authors of this paper have carried out certain qualitative analysis of conceptual model. A computer toolbox for simulation of informational processes in natural neural networks was developed for this purpose.

Olfactory bulb was chosen to carry out numerical experiments because of existence of deep research results in it; detailed data of structure are known [2]. Some essential constituents of thinking such as appearance of learning and identification, memory, imagination occur in the olfactory bulb [3-4]. Authors' attention is concentrated just on them.

This paper introduces experiment statements and their interpretations as well. When carrying out latest ones authors make their aim to confirm correctness of conceptual model [1] by computer simulation as much as possible on experimental object chosen.

---

## Correspondence Among Cells of Olfactory Bulb and Conceptual Model

---

There are unambiguous correspondence among many cells of olfactory bulb and conceptual model proposed by the reason of conceptual model and olfactory bulb is in relation of abstract – specific respectively. Basic correspondences between cells of olfactory bulb and ones of conceptual models are listed in Table 1.

Table 1. Basic correspondences between cells of olfactory bulb and ones of conceptual model

Olfactory bulb [2]	Conceptual model [1]
olfactory bulb	neuronal model, which satisfies conditions of conceptual model
tufted cell	symbol neuron
mitral cell	quasireceptor neuron

## Experimentation on Olfactory Bulb Model

Description of every experiment consists of two items:

1. Experimentation. There is description of actions made by experimenters. Construction of neural network for toolbox, essential input data to former and measurement of network output data were carried out in this part as well.
2. Interpretation of the experimentation results. What way obtained results fit the conceptual model were emphasized in this part in.

Every experiment description follows in detail. Note, planning of experiments and carrying out them have concurred because of absence of possible difficulties while experimenting.

**Output Signals and Identification.** Input signals enough for activation were being sent to inputs of receptor neuron, corresponding to one olfactory zone [2], during the time interval from 0 till 5 time units. Output was measured from mitral cell corresponding to olfactory zone above of. As a result action potentials (APs) were being generated by receptor neurons for period of time during which input signals were sent. After that formers finished (fig. 1). But generation of APs was going on in mitral cell after timestamp 5 as well.

As well as in mitral cell after stopping sending of input signal to receptor neuron, input generation of AP of tufted cell was going on too (fig. 3). That may be caused by large weight of connection between mitral and tufted cells.

Output signals of mitral cell but not tufted one were analyzed in this experiment as distinct from [2] it was performed. Former inconsistency between [1] and [2] is caused by fact, that authors of conceptual model described in [1] hold the opinion, which has some differences with one described in [2-4].

Since mitral cell excited after input signal to receptor neuron had stopped secondary spikes have been got [1]. It is evidence of identification of input stimulus because of mitral cell corresponding excited receptor neuron has excited. The fact of generation of AP after finishing sending of input signals to model indicates the short-term memorizing of stimulus as well.

**Checking of "Mental View" Existence.** Input signal was sent to postsynaptic membranes of tufted cells (but not receptor neurons) during the time interval from 0 till 5. Sending input signals was stopped after. During the time interval from 0 to 5 tufted cell was generating AP. Some time after timestamp 5 AP was being generated, after that it stopped (fig. 4).

When input signals was begun to send to input of tufted cell, tufted cell began to generate APs too. After finishing sending signal to inputs of tufted cell at timestamp 5 generation of APs in mitral cells was going on (fig. 5).

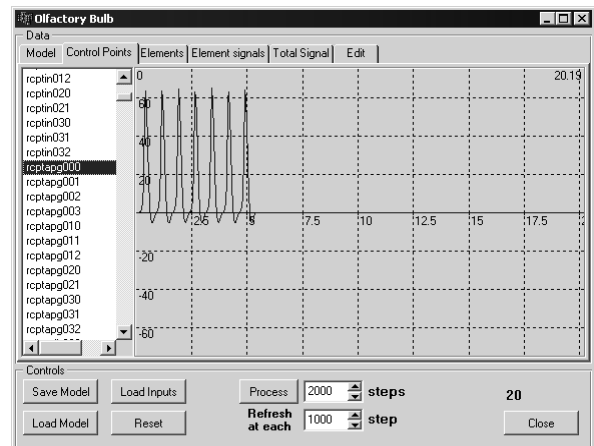


Figure 1. Generation of AP in receptor neuron.

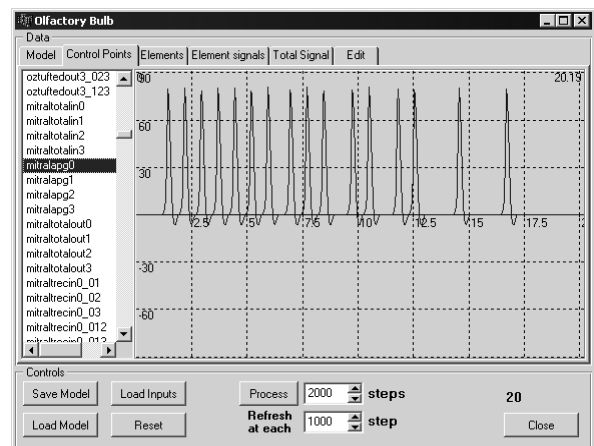
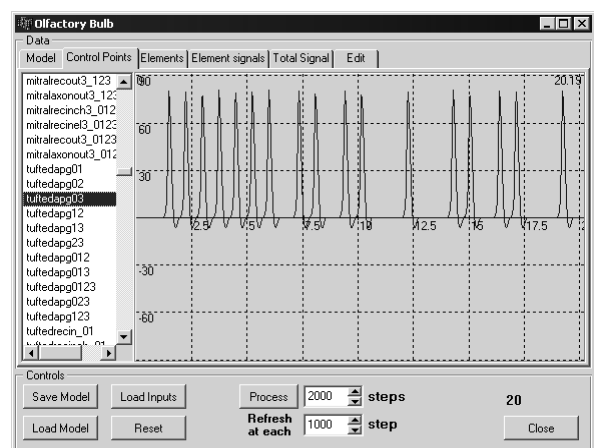


Figure 2. Generation of AP in mitral cell.



Exciting of mitral cell took place in this experiment, quasireceptor neurons were excited in other words. In conceptual model former corresponds to "imagination" of object in the moment this one is not represented in environment. In other worlds mental view [1] existence was confirmed in olfactory bulb.

**Short-term Memory as Feedforward and Feedback Between Mitral and Tufted Cells.** Connections from tufted cells to mitral ones going through granule cells [2] were broken before this experiment. During experimenting on olfactory bulb more precise definition for breaking had to be done since connections between tufted cells and mitral ones in our case are not direct, but though the granule cells [2] and are much complicated than simplest case of conceptual model. As the result there are possible several implementations. Thus three cases of breaking connections from tufted cells to mitral ones were distinguished in neural network modelling olfactory bulb:

1. by means of removing granule cell and all input and output connections with former;
2. by means of removing all connections from tufted cells to granule ones and from granule cells to mitral ones;
3. by means of removing all connections from granule cells to mitral ones.

In all three cases input signals were been sent to input of receptor neuron during the time interval from 0 till 5 time units. In the issue APs were generated by receptor neurons by the timestamp 5. APs were stopped after of course. (fig. 6).

Activity of principal neurons (mitral and tufted cells) had some differences by different means of experiment realization.

Let consider realization by means of first and second cases. When sending signals to receptor neuron inputs AP were being generated by tufted and mitral cells. After input signal sending stopped generation of AP stopped there immediately (fig. 7a, 7b, 8).

Breaking connections by means of 3 case when signal sending to receptor neuron inputs stop tufted cells generated additional AP as a response to inputs from themselves which came to from granule cells.

This experiment confirms well known hypotheses adhered by authors as well. It says closed neuronal cycles realize a function of short-term memory.

Thus repeated spikes in mitral cells didn't occurred cyclic connections above broken. It can be make up a conclusion that cyclic connection is one of the realization mechanisms of short-term memory.

**Learning by the Synaptic Plasticity.** Taking into account of modelling of synaptic connection weight growing when sending input signal to receptor neurons one of the short-term and long-term memory mechanisms are realized. It is long-term and short-term synaptic plasticity respectively.

Figure 3. Generation of AP in tufted cell.

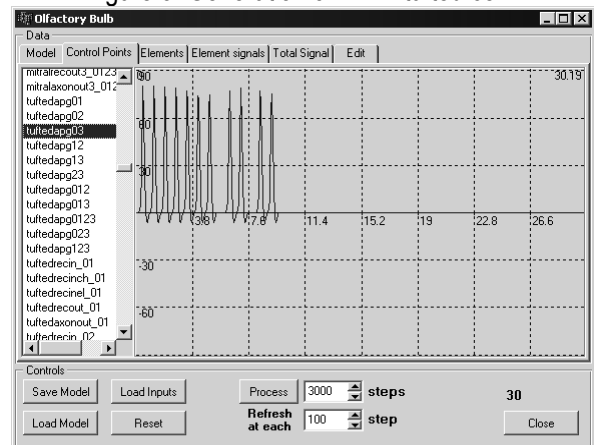


Figure 4. Generation of AP in tufted cell.

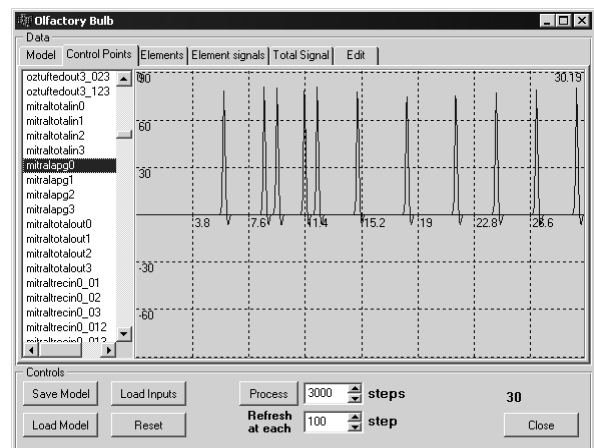


Figure 5. Generation of AP in mitral cell.

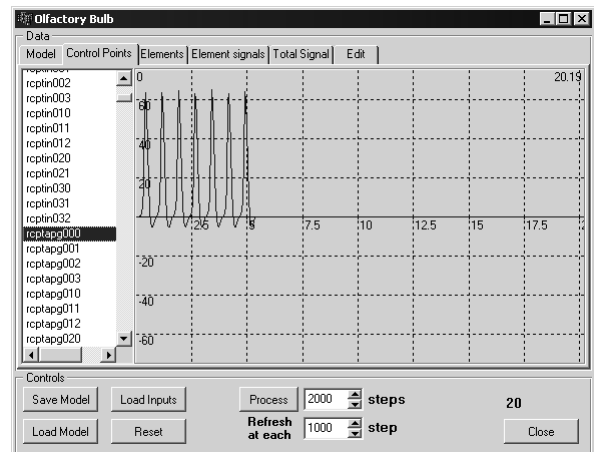


Figure 6. Generation of AP in receptor neuron.

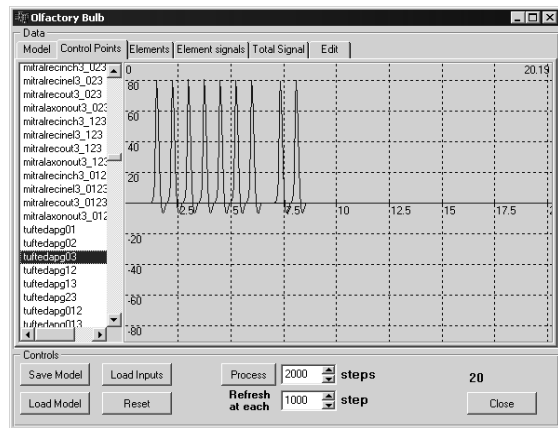
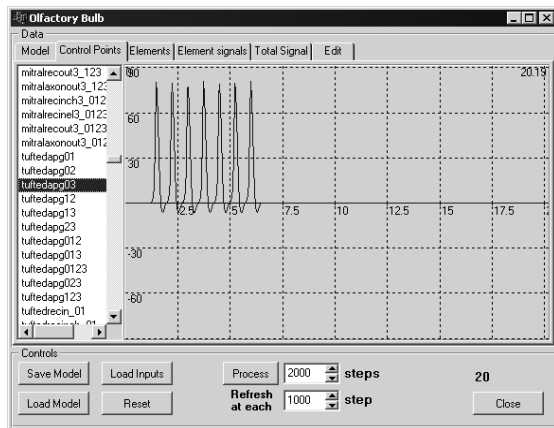


Figure 7. Generation of AP in tufted cell

a) by means of removing connection in 1 and 2 cases;

b) by means of removing connection in 3 cases.

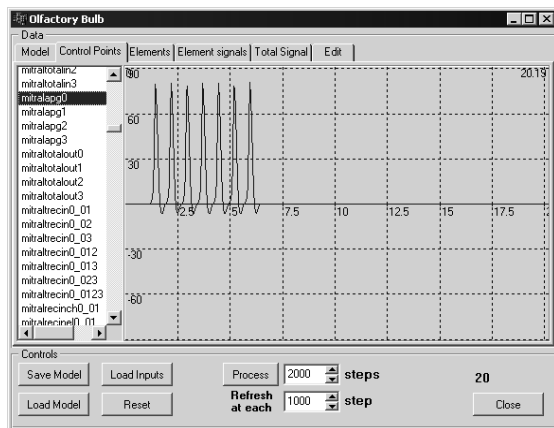


Figure 8. Generation of AP in mitral cell by means of removing connections in all three cases.

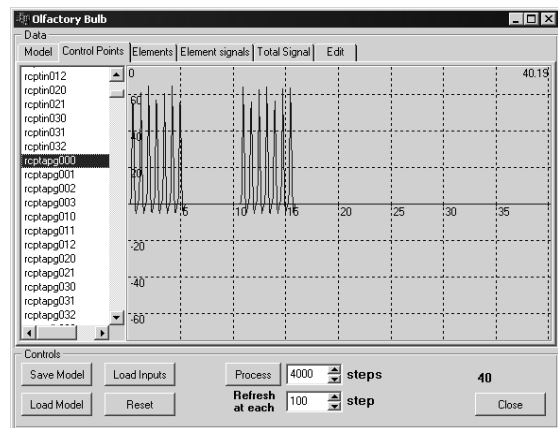


Figure 9. Generation of AP in receptor neurons during the time intervals from 0 till 5 and from 10 till 15.

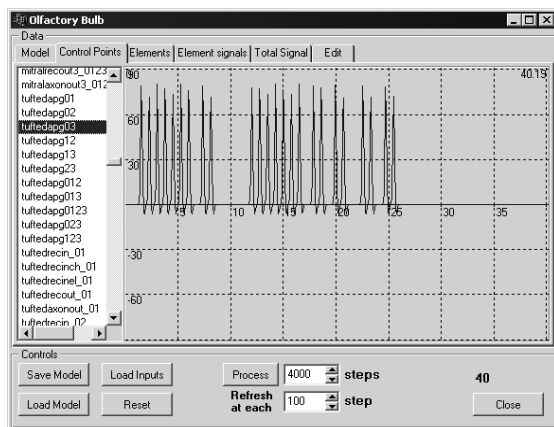


Figure 10. Generation of AP in tufted cells during the time interval from 0 till 15.

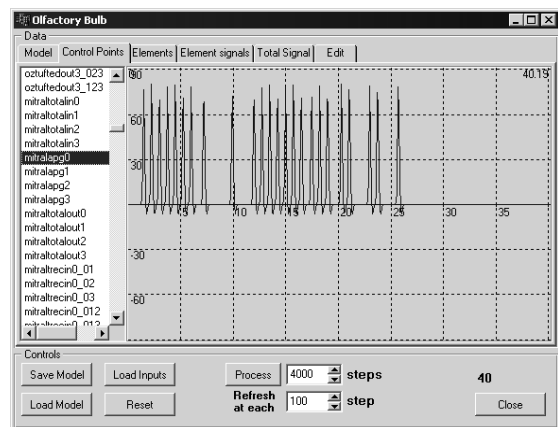


Figure 11. Generation of AP in mitral cells during the time interval from 0 till 15.

During the time intervals from 0 till 5 and from 10 till 15 units input signal was being sent to receptor neurons. Output signals of tufted and mitral cells were measured.

Receptor neurons were generating APs during former time intervals (fig. 9).

When sending input stimuli during time interval from 0 till 5 generation of APs by mitral cells and tufted ones held after input signals sending to receptors had finished (fig. 9-11).

When sending suitable input stimuli separated by short time interval (5 time units) while using toolbox it is obvious that output signal spread much longer during the second time interval of input stimuli sending (from 10 till 15) than during the first one (from 0 till 5) (fig. 9-11)

Synaptic plasticity corresponds to growing of weight of feedforwards and feedbacks in conceptual model. Hence one of the mechanisms of learning is realized in terms of conceptual model. Since outputs of mitral cells and tufted ones were spreading longer in presence of growing of synaptic weights in complex neuronal interactions of tufted, mitral and granule cells, it can be concluded that phenomena of synaptic plasticity conform to its function expected in conceptual model entirely.

---

## Conclusion

---

Following hypotheses concerning conceptual model have been confirmed in the issue of carrying out of experiments by computer simulation: key function of quasisymbol neurons at the time of the identification of the pattern represented in environment, existence of mental view [1], functions of cyclic connections (feedforward and feedback) between symbol and quasisymbol neurons as short term memory. Important functions of synaptic plasticity in learning processes are confirmed also.

Described above experiments confirm principal positions of conceptual model on quantitative level. Former positions were discussed as credible hypotheses of its authors before. But it must be emphasized that results of experiments do not ensure the full correctness of conceptual model, they can be treated as partial confirmation of this one.

Principal positions of conceptual model which could be verified on olfactory bulb model were confirmed in this paper. They confirm validity of fundamental backgrounds of conceptual model not only on qualitative level, but on quantitative one too.

---

## Bibliography

---

- [1] Z.L. Rabinovich About natural mechanisms of thinking and intellectualization of computing machines. Cybernetics and system analysis. No. 5, 2003, pp.82-88.
  - [2] V.A. Izotov and G.S. Voronkov. Computer Modelling of the Mechanisms of Information Processing in the Olfactory System. I. A Model of Structural and Functional Organization of Neuron Elements of the Olfactory Bulb and the Receptor Epithelium. Biofizika, Vol. 46, No. 4, 2001, pp. 696–703.
  - [3] V.A. Izotov and G.S. Voronkov. Computer Modelling of the Mechanisms of Information Processing in the Olfactory System. II. The Mechanisms of Identification and Short-term Storage in the Olfactory Bulb: the Results of the Computer Experimentation. Biofizika, Vol. 46, No. 4, 2001, pp. 704–708.
  - [4] V.A. Izotov and G.S. Voronkov. Computer-assisted Modelling of the Mechanisms of Information Processing in the Olfactory System. III. Reproduction of Psychophysical Phenomena by the Olfactory Bulb Model. Biofizika, Vol. 47, No. 5, 2002, pp. 914–919.
- 

## Authors' Information

---

**Yuriy A. Byelov** – professor, doctor of physical-mathematical sciences, Taras Shevchenko National University in Kyiv, Ukraine, 03680, Kyiv - 680, Academician Glushkov avenue 2, building 6, e-mail: [belov@ukrnet.net](mailto:belov@ukrnet.net)

**Sergiy V. Tkachuk** – post-graduate student, Taras Shevchenko National University in Kyiv, Ukraine, 03680, Kyiv - 680, Academician Glushkov avenue 2, building 6, e-mail: [tksergiy@gmail.com](mailto:tksergiy@gmail.com)

**Roman V. Iamborak** – post-graduate student, Taras Shevchenko National University in Kyiv, Ukraine, 03680, Kyiv - 680, Academician Glushkov Avenue 2, building 6, e-mail: [yambor@ukrpost.net](mailto:yambor@ukrpost.net)

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ОБРАЗНОГО МЫШЛЕНИЯ В КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ: ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЫШЛЕНИЯ

Юрий Валькман, Вячеслав Быков

**Abstract.** *This study considers the problems of modelling the creative image thinking in field of computer technologies. Special attention concentrates on representation of general thinking rules in knowledge bases of intelligent system. Such rules are well-known to psychologists, but specialists in computer sciences are less familiar with these matter. The paper to a greater extent is directed to initialize the discussions on the stated problem with indicating the main topics of subjects.*

**Key words:** *Image, thinking, computer technology, artificial intelligence.*

---

### Введение

Сложность моделирования образного мышления в компьютерных системах очевидна. С нашей точки зрения, во многом это обусловлено общими закономерностями мышления, которые давно определили психологи (см., например, [Арнхейм, 1973; Клацки, 1978, Зинченко, 1997; Ротенберг, 1999; Псих. процессы, 2004]) и которые трудно моделируемы компьютерными технологиями. Эти закономерности должны найти отражения в базах знаний (БЗ) образного мышления. Здесь мы рассмотрим эти закономерности с целью анализа возможностей *“погружения их в вычислительную среду”*.

Данная работа является продолжением исследований, некоторые результаты которых изложены в [Валькман, 2003а; Валькман, 2003в; Валькман, Исмагилова 2004; Валькман, Быков, 2004; Валькман, 2004].

В соответствии с мнением известного японского ученого [Мизогучи, 2000] в среде специалистов по искусственному интеллекту имеет место три главных сдвига в основной парадигме:

- *переход от процессно-центрированного к информационно-центрированному,*
- *переход от компьютерно-центрированного к человеко-центрированному и*
- *переход от формо-центрированного к содержательно-центрированному.*

С нашей точки зрения, все три фактора, определенные Р. Мизогучи, явно и неявно относятся к моделированию образного мышления. Мышление это непрерывное взаимодействие мыслящего субъекта с объектом познания. Это взаимодействие всегда осуществляется в *целях разрешения какой-то проблемы*, оно основано на анализе и синтезе и имеет своим результатом новое обобщение. Таким образом, психологи считают, что общими закономерностями мышления являются: *проблемность, анализ-синтез, обобщенность, константность восприятия*. Кроме этого, представляется целесообразным исследовать следующие закономерности представления образов в процессах мышления: *классификация, объективность и субъективность образов, «близость» (единство) целей и средств, открытость образов, их нечеткость, образы в левом и правом полушариях головного мозга.*

---

### 1. Проблемность мышления

**ЧЕЛОВЕК.** Мышление всегда возникает в связи с решением какой-либо проблемы, а сама проблема возникает из проблемной ситуации. Проблемная ситуация это такое обстоятельство, в котором человек встречается с чем-то новым, непонятным с точки зрения имеющихся знаний. Эта ситуация характеризуется возникновением определенного познавательного барьера, трудностей, которые предстоит преодолеть в результате мышления. В проблемных ситуациях всегда возникают такие цели, для достижения которых имеющихся средств, способов и знаний оказывается недостаточно.

Проблема особая разновидность вопроса, ответ на который не содержится в нашем опыте и знаниях и поэтому требует соответствующих практических и теоретических действий. Проблема сосредоточивает наше внимание на недостаточности или отсутствии знаний (*это знание о незнании*).

Проблема - это осознание необходимости нового познания. Не любая умственная деятельность является решением проблемы. Например, решая задачу известным нам способом, мы осуществляем умственную деятельность, но не решаем проблемы. Познание, открытие новых, пока еще неизвестных сторон объекта всегда осуществляется через отношения, взаимосвязи, в которых эти свойства проявляются. Мышление это познание того, что не дано непосредственно, но находится в определенном отношении к тому, что дано.

**КОМПЬЮТЕР.** *Явно и неявно моделированием инициации действий в вычислительной системе занимаются давно: процедуры-демоны в фреймах у М. Минского, идеология программирования "от данных", методы классов в объектно-ориентированном проектировании, агентно-ориентированное программирование и т.д. Д.А.Поспелов назвала это необходимым свойством интеллектуальных систем активностью знаний.*

*Однако, в полной мере эта общая закономерность мышления трудно моделируется. Поскольку предполагается, что для порождения проблемы сначала необходимо, проанализировав всю БЗ, определить суть противоречия или недостаточности знаний (сформулировать задачи в форме: дано..., необходимо сделать ...), затем найти решение (желательно посредством компьютерной технологии, с минимальным диалогом с пользователем). Построить полную модель, таким образом, означает создать "творческий компьютер". Но некоторые задачи в этом приложении решаются.*

---

## 2. Взаимодействие анализа и синтеза

---

**ЧЕЛОВЕК.** Всякий акт мышления, каждая мыслительная операция основаны на анализе и синтезе. Как известно, основным принципом высшей нервной деятельности является принцип анализа и синтеза. Мышление как функция мозга также основано на этом принципе.

На анализе и синтезе основаны все ступени мыслительного процесса. Всякий поиск ответа на какой-либо вопрос требует и анализа и синтеза в их *различных связях* (производными от анализа и синтеза мыслительными операциями являются абстракция и обобщение).

Анализ - выделение тех сторон объекта, которые существенны для решения данной задачи; это выявление строения исследуемого объекта, его структуры, расчленение сложного явления на простые элементы, отделение существенного от несущественного. Анализ дает ответ на вопрос: какая часть целого обладает определенными признаками. Результаты анализа объединяются, синтезируются.

Синтез объединение элементов, частей, сторон на основе установления существенных в определенном отношении связей между ними.

Основным механизмом мышления, его общей закономерностью является *анализ через синтез*: выделение новых свойств в объекте (*анализ*) осуществляется через соотнесение его (*синтез*) с другими объектами. В процессе мышления объект познания постоянно включается во все новые связи и в силу этого выступает во все новых качествах, которые фиксируются в новых понятиях; из объекта, таким образом, как бы вычерпывается все новое содержание; он как бы поворачивается каждый раз другой своей стороной, в нем выявляются все новые свойства.

**КОМПЬЮТЕР.** *В компьютерных технологиях мы вынуждены рассматривать отдельно четыре операции: анализ, синтез, синтез через анализ и анализ через синтез. Эти операции в значительной степени зависят от формы и формата представления анализируемого и/или синтезируемого образа: образы могут быть графическими, вербальными, звуковыми и т.д. Ранее в ВЦ РАН строилась система ТЕКРИС – генерации рисунков на основе текстов (анализ текста – синтез графического образа). Известны синтезаторы и анализаторы речи, музыки. Значительные успехи достигнуты в построении естественно-языковых (ЕЯ) интерфейсов, анализе ошибок в ЕЯ-текстах. Известны эффективные распознаватели текстов и графических образов. Для эффективной работы таких компьютерных анализаторов необходимы большие многоуровневые словари графемных, фонемных, морфемных, лексемных и пр. конструкций. В настоящее время начинают активно использовать идеологию онтологий в решении проблем анализа. Успехи в области синтеза более скромны. Так, например, синтез реферата или аннотации больших текстов нельзя назвать успешным. Но это не удивительно: производить синтез без анализа семантики невозможно. Проблема Мельчука "текст–смысл–текст" еще ждет своего решения. Связано это также с моделированием понимания (см., например, [Валькман, Быков, 2004]). Заметим, здесь мы текст трактуем весьма широко. Это может быть любая информация, отраженная на некотором носителе (по сути, знаковый образ).*

---

### 3. Обобщенность

---

**ЧЕЛОВЕК.** Анализ и синтез, взаимно переходя друг в друга, обеспечивают непрерывное движение мысли все к более и более глубокому познанию сущности явлений. Процесс познания начинается с *первичного синтеза* восприятия нерасчлененного целого (явления, ситуации). Далее на основе *анализа* осуществляется *вторичный синтез*. Получаются новые знания об этом целом, а это познанное целое вновь выступает как база для дальнейшего *глубокого анализа* и т.д.

Анализ - вычленение таких свойств (сторон) объекта, которые имеют существенное значение для последующего *синтеза, обобщения*. При этом проявляются такие закономерности мышления как *селективность, избирательное вычленение одноплановых сторон* объекта и рефлексивность контроль над течением мыслительного процесса (рассуждение человека с самим собой), самоотчет мышления перед самим собой. При анализе развивающихся событий возникает особая разновидность аналитического мышления *антиципация, предвосхищение* возможного наступления новых событий, предвидение возможных результатов определенных действий.

Мышление осуществляется с целью познания тех или иных существенных свойств объекта, с целью получения знания. Существенное свойство является всегда *общим* для данной группы однородных предметов (но не всякое общее свойство является существенным). К решению отдельной конкретной задачи мы применяем обобщенные знания, общие правила.

В процессе мышления *единичное* всегда рассматривается как конкретное выражение *общего*.

**КОМПЬЮТЕР.** Проблема обобщенности с одной стороны тесно связана с анализом–синтезом, с другой – с классификацией (см. раздел 5). В прикладной семиотике рассматриваются [Поспелов, Осипов, 2002] операции обобщения: по именам, по признакам, по характеристикам и по структуре. Первая операция (установление отношений “элемент–класс”) в настоящее время носит пока не доступный компьютеру характер. По сути, речь идет об установлении синтагматических отношений, например, “стол, стул, кровать, ...— мебель”. Или как определить, что относится к “инструменту”, “оружию”, “галантерее”. Обобщение по признакам (отношение “род–вид”) в компьютерных технологиях успешно производится с использованием фреймовых структур понятий, метода гиперплоскостей, узнавания (распознавания) М.М. Бонгарда, метода растущих пирамидальных сетей В.П. Гладуна. Обобщение по характеристикам иногда относят к обобщению по признакам. Но это неверно. Приведем примеры: как определить признаки понятия “симпатичная женщина” (здесь более уместны неформальные операции: рассуждения по аналогии, ассоциативный или метафорический вывод). Или установление отношений “часть–целое” между понятиями разного уровня: по ножке определить, что это - стул; коробка передач – часть автомобиля. Фактически, это – тоже синтагматические отношения, которые с трудом моделируемы в вычислительной среде. Операция обобщения по структуре связана с операцией поиска по образцу [Поспелов, Осипов, 2002]. Здесь имеются некоторые успехи. Но в целом эта общая закономерность мышления пока трудно воспроизводима в интеллектуальных технологиях.

---

### 4. Константность восприятия

---

**ЧЕЛОВЕК.** Одни и те же предметы воспринимаются нами в различных изменяющихся условиях: при различной освещенности, с разных точек зрения, с разного расстояния. Однако объективные качества предмета воспринимаются нами в неизменном виде. *Константность восприятия* - независимость отражения объективных качеств предметов (величины, формы, цвета) от временных условий. Изображение величины предмета на сетчатке глаза при восприятии его с близкого расстояния и с далекого расстояния будет разным. Однако это интерпретируется нами как удаленность или приближенность предмета, а не как изменение его величины. При восприятии прямоугольного предмета (папки, листа бумаги) с разных точек зрения на сетчатке глаза могут отобразиться и квадрат, и ромб, и даже прямая линия. Однако во всех случаях мы сохраняем за этим предметом присущую ему форму.

Белый лист бумаги вне зависимости от его освещенности будет восприниматься как белый лист, так же, как кусок антрацита будет восприниматься с присущим ему цветовым качеством вне зависимости от условий освещения. Константность восприятия не наследственное качество, оно формируется в опыте, в процессе обучения. В некоторых непривычных условиях она может быть нарушена.

Возникает аконстантность. Так, если мы смотрим вниз с большой высоты, то привычные для нас предметы могут восприниматься несколько искаженно (например, люди, автомобили кажутся нам неестественно уменьшенными). Благодаря константности восприятия мы узнаем предметы в разных условиях и успешно ориентируемся среди них.

**КОМПЬЮТЕР.** *Можно с уверенностью сказать, что проблема константности восприятия – одна из главных в компьютерном зрении. Научить робота распознавать объекты независимо от угла зрения, проекции, освещенности, дальности и т.п. факторов мы пока не умеем. Не ясно, как строить БЗ возможных образов данного объекта. Конечно, желательно, чтобы возможные проекции строились автоматически, но в какой цифровой форме должен храниться объект и как строить соответствующие операции пока непонятно.*

---

## 5. Классификация

---

**ЧЕЛОВЕК.** *Образное восприятие мира — одно из загадочных свойств живого мозга, позволяющее разобраться в бесконечном потоке воспринимаемой информации и сохранять ориентацию в океане разрозненных данных о внешнем мире. Воспринимая внешний мир, мы всегда производим классификацию воспринимаемых ощущений, т. е. разбиваем их на группы похожих, но не тождественных явлений. Например, несмотря на существенное различие, к одной группе относятся все буквы А, написанные различными почерками, или все звуки, соответствующие одной и той же ноте, взятой в любой октаве и на любом инструменте, а оператор, управляющий техническим объектом, на целое множество состояний объекта реагирует одной и той же реакцией. Характерно, что для составления понятия о группе восприятий определенного класса достаточно ознакомиться с незначительным количеством ее представителей. Ребенку можно показать всего один раз какую-либо букву, чтобы он смог найти эту букву в тексте, написанном различными шрифтами, или узнать ее, даже если она написана в умышленно искаженном виде. Это свойство мозга позволяет сформулировать такое понятие, как образ.*

Образы обладают характерным свойством, проявляющимся в том, что ознакомление с конечным числом явлений из одного и того же множества дает возможность узнавать сколь угодно большое число его представителей. Примерами образов могут быть: река, море, жидкость, музыка Чайковского, стихи Маяковского и т. д.

**КОМПЬЮТЕР.** *Человек в состоянии по части образа “угадывать” (синтезировать в мозге) весь образ. При этом в качестве части может выступать некоторый фрагмент (или фрагменты), некоторая проекция иногда “неожиданная”, некоторый аспект (запах, вкус, тактильные ощущения, звуковые ...). Так человек по фрагменту города может “вычислить” весь город. На этом основаны многие загадки.*

*Поэтому в вычислительной среде мы должны по части некоторого образа “вытянуть” все, что относится к данному образу, или ассоциации, связанные с поисковым фрагментом.*

*Отчасти эта закономерность мышления связана с константностью восприятия (см. раздел 4). Поэтому многие считают соответствующую операцию невозпроизводимой в компьютере. Однако “файнридер” иногда удачно распознает многие буквы независимо от шрифтов, размеров, языков и т.д. В компьютере мы автоматически переходим от “кириллицы” к “ареалу”, “готическому шрифту” и т.д. Но это, конечно, еще только начало.*

---

## 6. Объективность и субъективность образов

---

**ЧЕЛОВЕК.** *Образы обладают характерными объективными свойствами в том смысле, что разные люди, обучающиеся на различном материале наблюдений, большей частью одинаково и независимо друг от друга классифицируют одни и те же объекты. Именно эта объективность образов позволяет людям всего мира понимать друг друга.*

Способность восприятия внешнего мира в форме образов позволяет с определенной достоверностью узнавать бесконечное число объектов на основании ознакомления с конечным их числом, а объективный характер основного свойства образов позволяет моделировать процесс их распознавания. Будучи отражением объективной реальности, понятие образа столь же объективно, как и сама реальность, а поэтому это понятие может быть само по себе объектом специального исследования.

С другой стороны, ОБРАЗ — субъективная представленность предметов окружающего мира, обусловленная как чувственно воспринимаемыми признаками, так и гипотетическими конструктами. Являясь основой для реализации практических действий по овладению окружающего мира, образ также определяется характером этих действий, в процессе которых исходный образ видоизменяется, все более удовлетворяя практическим нуждам.

Нужно сказать, что подобный ход мысли можно обнаружить не только у физиологов, но и у психологов. Следствием его является то, что в психологии термин "объективное описание" употребляется в качестве синонима термина "физиологическое описание", а "психологическое" — в качестве синонима "субъективное".

**КОМПЬЮТЕР.** *Субъективность образов, прежде всего, определяется различием "естественной БЗ" (как декларативной, так и процедурной компонент) у разных людей. Есть ли необходимость отражать эту общую закономерность в компьютерных технологиях? С одной стороны, у любого метода, алгоритма есть автор, как и у любой БЗ. Поэтому соответствующая компьютерная технология субъективна. С другой стороны, погружение в вычислительную среду соответствующих знаний осуществляется тогда, когда эти знания уже апробированы и "доказали" свою эффективность в тех или иных процессах, поэтому уже стали в некоторой мере объективными.*

*Различные компьютерные системы (создатели-то разные!) одну и ту же функцию могут выполнять различно. Но в отличие от людей, мы можем обмениваться компьютерными БЗ, объединять их, дополнять БЗ своего компьютера "чужими" знаниями.*

---

## 7. Единство целей и средств

---

**ЧЕЛОВЕК.** Принцип разделения средств и целей, т.е., та идея, что одна цель может быть достигнута множеством способов, а одно средство применено для достижения разных целей лежит в основе всех видов человеческой деятельности. В [Прудков, 2004] подчеркивается, что принцип разделения целей и средств неприменим для понимания человеческого мышления. В ответ на требования ситуации мозг всегда одновременно формирует цель и средства для ее достижения. Это происходит в процессе самоорганизации в определенных структурах мозга, причем процесс самоорганизации протекает таким образом, чтобы минимизировать затраты на формирование цели и средств. Под целью, в данном случае, не обязательно понимается, как это делается обычно, какой-то осознаваемый результат, а любой состояние, которое должно быть достигнуто. Средство — это любая активность, необходимая для достижения цели: такая активность может остаться неосознанной, а может вылиться в диссертацию или в меморандум по подготовке к войне. Самоорганизация — процесс совершенно автоматический и не поддается сознательному контролю.

Гипотеза одновременного формирования объясняет ежедневную рациональность тем, что мозг пытается строить достижимые цели с минимальными затратами, а привычные способы действий как раз и позволяют минимизировать затраты на самоорганизацию.

**КОМПЬЮТЕР.** *Отношения "цель–средства достижения" на различных уровнях автоматизации всегда моделировались в интеллектуальных (или интеллектных) системах управления [Васильев, 2000].*

*В настоящее время проблема моделирования целеполагания встала с особой остротой ввиду декларации нового научного направления "Целеустремленные системы". Вместе с тем в рамках проблематики мультиагентных систем этой проблемой (анализ ресурсов достижения целей, планирование, принятие решений, моделирование последствий соответствующих действий) занимаются давно (см., например, [Тарасов, 2002]).*

---

## 8. Открытость образов

---

**ЧЕЛОВЕК.** Одно из самых сложных свойств образа — его открытость [Зинченко, 1997]. Развитие образа бесконечно. Есть автономная жизнь образа или жизнь в образах. Есть неконтролируемое саморазвитие образа, подобное саморазвитию мысли. Включение образа и, соответственно, визуального мышления в психологию и логику развития теоретического мышления приблизит последнее к разуму. Визуальное мышление — это человеческая деятельность, продуктом которой является порождение новых образов,

создание новых визуальных форм, несущих определенную смысловую нагрузку и делающих значение видимым. Эти образы, как и слова языка, отличаются автономностью и свободой по отношению к объекту восприятия. Порождение новых образов, мыслей осуществляется благодаря способности оперирования и манипулирования образами. Их столкновение и конфликты вытекают искры новых смыслов. Деятельность визуального мышления преобразует «глаз видящий» в «глаз знающий» [Арнхейм, 1973]. Образ как допущение, всегда гипотеза и не только перцептивная, но и интеллектуальная.

В разуме равнопрочно представлены действие, слово (понятие) и образ, т.е. разные, но взаимодополняющие и взаимодействующие одна с другой проекции реальности, в том числе и виртуальной. К взаимодействию и к ответственному порождению нового способны только живые образы, понятия и действия [Зинченко, 1997].

**КОМПЬЮТЕР.** Проблема моделирования операций со знаковыми системами в середине 90-х годов прошлого века привела к открытию нового направления в проблематике искусственного интеллекта «Прикладной семиотики». Напомним, что в прикладной семиотике к традиционной четверке, описывающей формальную систему, добавляется еще четыре компонента: изменения элементов базового множества, изменения аксиоматики, модификации правил синтаксического вывода и семантической корректности. Знак является частным случаем образа. Поэтому, открытость знаковых систем прикладной семиотики еще в большей мере характерна для систем образного мышления. Основная сложность моделирования сложных систем заключается в отсутствии замкнутости, характерной для любых дедуктивных, формальных структур. Это означает, что в образе всегда могут появиться новые компоненты, новые отношения как «внутри него», так и новые связи с другими образами. Некоторые компоненты могут удаляться (как и отношения), модифицироваться. Все эти факторы заставили В.П.Зинченко назвать образ «живым». Но, вместе с тем, в каждый момент времени образы обладают целостностью, достаточной для проведения над ними некоторых операций и/или установления определенных отношений.

Поэтому, в вычислительной среде могут моделироваться некоторые лишь некоторые фрагменты («островки») формального представления образов и операций с ними. В целом эта проблема вероятно в обозримом будущем решена не будет. Заметим, она сложна и для психологов [Зинченко, 1997, Псих. процессы, 2004].

---

## 9. Нечеткость образов

---

**ЧЕЛОВЕК.** Эта проблема образного мышления анализировалась в [Валькман, 2003].

1) Образ в памяти, чтобы им можно было пользоваться, обязательно должен быть *нечетким*. Если бы образы были полностью детализированы, как фотографии, они не могли бы служить для хранения *неполной* информации, которой мы в основном оперируем. Контексты всегда определяются одной или несколькими фразами. С помощью ассоциативных отношений мы сами «дополняем» и строим соответствующие образы. Следовательно, и контекст всегда *неполон, неоднозначен, неточен*.

2) С нашей точки зрения эта *нечеткость* образов (их текстов и контекстов) является их основной характеристикой, отличающей их от остальных видов образов. Любой «внешний» образ, представленный (зафиксированный) на каком-либо носителе с помощью некоторого языка или системы знаков, всегда является *четким*. *Нечеткость* образов, которые возникают у нас при восприятии (и интерпретации) тех или иных данных является результатом их трактовки.

3) Именно *нечеткость* образов обеспечивает возможность хранения в памяти человека таких огромных объемов знаний. *Нечеткость* и *неполнота* образов обуславливают множественность их связей между собой. Поэтому можно говорить о сильной взаимосвязанности различных образов. Сильная их взаимосвязь множеством отношений является основой ассоциативных, интуитивных выводов и является основой образного мышления. Именно множественность, *неоднозначность* и *неопределенность* отношений образов обеспечивает эвристические процедуры мышления.

4) *Нечеткость, неполнота, неоднозначность* и *неопределенность* отношений операций между собой образного мышления являются базой для нетривиальных решений, творчества, преодоления стереотипов.

5) Такие операции, как *концентрация* и *вытеснение*, выявления *сходства-различия* (и, видимо, все «остальные» операции образного мышления) в качестве операндов используют только *неполные, неточные, неоднозначные, недоопределенные, нечеткие* образы. Такие же образы являются результатом этих операций.

6) *Нечеткость, неполнота, неоднозначность и неопределенность* образов обеспечивает возможность работы и достижения взаимопонимания с определениями объектов на уровне «договорной семантики». А так определенных объектов – большинство.

Специалисты в области когнитивной психологии выделяют три основных типа (семантической) репрезентации понятий в нашей памяти: *посредством прототипа (эталона), с помощью характерных признаков, посредством множества типичных объектов.*

Все три типа образов *нечетки, неполны, недоопределены, неточны.* Эталон строится так, чтобы ему соответствовало множество «внешних» образов. Поэтому необходима *вариабельность* эталонного образа. Можно говорить и о *неоднозначности, неточности, неполноте* эталона. Синтез образов на основе базовых признаков, предполагает существование других характеристик объектов. Следовательно и этот образ обладает *неполнотой и недоопределенностью.* Фактически этот тип образа представляет собой агрегатное отношение. Третий тип репрезентации – родо-видовое отношение. Множество типичных объектов *неполно и недоопределено.*

Теперь ОБЩИЙ ВЫВОД:

Образное мышление в значительной степени (если не полностью) опирается на НЕ-факторы, как в представлении объектов и их отношениях, так и в операциях с ними. Быть может – это главная характеристика образного мышления. НЕ-факторы и работа в их условиях не слабость (или недостаток) образного мышления, а его сила!

**КОМПЬЮТЕР.** Для моделирования НЕ-факторов (см. [Нариньяни, 2003]) в настоящее время разработано несколько, эффективных в частных приложениях, формальных аппаратов: *нечеткая математика, нейросети, интервальный анализ, генетические алгоритмы и т.д.* Однако, не все они адекватны решению проблематики моделирования образного мышления, в частности, погружения в вычислительную среду образов (которые «обросли НЕ-факторами вследствие своей принципиальной открытости»). Но, главное, мы еще не конца разобрались, что собственно надо здесь моделировать. «Словесных этикеток» мало, надо четко определить их смысл в приложении к образам. Тогда встанет проблема – КАК это моделировать. И, возможно, будут разработаны соответствующие формальные аппараты.

---

## 10 «Левые» и «правые» образы

---

**ЧЕЛОВЕК.** Два типа мышления, две стратегии полушарий... В нормальных условиях между ними нет антагонизма, нет конкуренции. Они тесно сотрудничают, взаимодействуют, дополняя и обогащая друг друга.

Согласно этой концепции, левое полушарие из всего обилия реальных и потенциальных связей выбирает немногие внутренне непротиворечивые, не исключающие друг друга, и на основе этих немногих связей создает однозначно понимаемый контекст. Прекрасным примером такого контекста является текст хорошо написанного учебника по естественным наукам. Однозначность обеспечивает также логический анализ предметов и явлений, последовательность перехода от одного уровня рассмотрения к другому. При этом все остальные связи, способные усложнить и запутать картину, сделать ее менее определенной и, упаси боже, внутренне противоречивой все эти связи безжалостно усекаются.

Правое полушарие занято прямо противоположной задачей. Оно «схватывает» реальность во всем богатстве, противоречивости и неоднозначности связей и формирует многозначный контекст. Речь, во всяком случае, речь не поэтическая, принципиально не предназначена для передачи и выражения такого контекста, поскольку строится по законам левополушарного мышления. Именно поэтому «мысль изреченная есть ложь». Наконец, все то же самое относится к попытке описания чувств и межличностных отношений, которые у нормальных, психически здоровых людей всегда многозначны [Ротенберг, 1999].

Оба полушария выполняют равно важные функции. *Левое полушарие упрощает мир*, чтобы можно было его проанализировать и соответственно повлиять на него. Правое полушарие схватывает мир таким,

каков он есть, и тем самым преодолевает ограничения, накладываемые левым. Без правого полушария мы превратились бы в высокоразвитые компьютеры, в счетные машины, тщетно пытающиеся приспособить многозначный и текучий мир к своим ограниченным программам.

**КОМПЬЮТЕР.** Психологи образное мышление связывают с процессами правополушарного мышления. И, как правило, операции синтеза образа в памяти и генерации образов в процессе коммуникации не относят к правополушарному мышлению. Заметим, обе эти операции относятся к моделированию отношений «системы» образного мышления с внешней средой.

В компьютерных технологиях к моделированию образного мышления мы относим отражение в вычислительной среде всех процессов, связанных с образами (в широком смысле).

Наш интерес к исследованиям психологов в этой научной области обусловлен двумя целями. Во-первых, в правом полушарии производятся наиболее значимые для интеллектуальных процессов операции. Во-вторых, мы надеемся использовать результаты работы психологов, теперь и когнитологов [Солсо, 1996] в создании эффективных компьютерных комплексов.

Например, анализ возможности моделирования в вычислительной среде поддержки целостности недоопределенных «правых» образов и их мультиконтекстности (многозначности) уже сейчас можно сформулировать как проблему.

Специалистов в области искусственного интеллекта давно интересовал вопрос: всегда ли образ распадается на компоненты (признаки, характеристики, свойства). Так, одно из многих определений понятия образа дано в [Клацки, 1978]: «Образ – это конфигурация из нескольких элементов, составляющих некое целое».

Теперь понятно, что «левые образы» состоят из отдельных элементов (из некоего словаря, например, графем или морфем). И этот образ всегда находится в одном контексте интерпретации. «Правые образы» – некая целостность, существующая одновременно во многих контекстах понимания. И только поддержка тесного взаимодействия «левых» и «правых» образов может обеспечить эффективное моделирование образного мышления. При этом взаимодействие должно быть децентрализованным.

---

## Заключение

Мы признаем отсутствие в материалах конструктивных решений по созданию соответствующих программных комплексов. Полагаем, проблема сложна, и требуется еще большая аналитическая работа. Представленный материал в большей мере является приглашением к дискуссии с обозначением ее тем.

**P. S.** Полный текст статьи содержит двадцать страниц. Желающие могут получить его электрон. почтой.

---

## Литература

- [Арнхейм, 1973] Арнхейм Р. Визуальное мышление // Зрительные образы: феноменология и эксперимент. Ч. 2. Душанбе, 1973.
- [Валькман, 2003а] Валькман Ю.Р. Не-факторы — основа образного мышления // Труды II-го Междунар. научно-практ. семинара «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Москва: Физматлит, 2003. С. 26–33.
- [Валькман, 2003в] Валькман Ю.Р. Категории «образ» и «модель» в когнитивных процессах // Труды междунар. конф. «Интеллектуальные системы» (ICAIS'03), Геленджик-Дивноморское, Москва: Физматлит, Том 2, 2003, С. 318–323.
- [Валькман, 2004] Валькман Ю.Р. Контексты в процессах образного мышления: определения, отношения, операции // Тезисы докладов I Российской конференции по когнитивной науке, 9-12 октября, Казань, 2004, С. 46-47.
- [Валькман, Быков, 2004] Валькман Ю.Р., Быков В.С. Интеллектуальные системы: о моделировании понимания // Труды междунар. конф. «Интеллектуальные системы» (ICAIS'03), Геленджик-Дивноморское, Москва: Физматлит, Том 2, 2004, С. 318–323.
- [Валькман, Исмаилова 2004] Валькман Ю. Р., Исмаилова Л. Р. О языке образного мышления // Труды Международного семинара Диалог'2004 «Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии». 2004. С. 72-80.

- [Васильев и др., 2000] Интеллектуальное управление динамическими системами / Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федун Б.Е. – Москва: Физматлит., 2000.
- [Зинченко, 1997] *Зинченко В.П.* Образ и деятельность. — Воронеж, 1997.
- [Клацки, 1978] *Клацки Р.* Память человека. Структуры и процессы. – Москва: Изд-во "Мир", 1978.
- [Мизогучи, 2000] *Мизогучи Р.* Шаг в направлении инженерии онтологии // Новости искусственного интеллекта. — 2000. — №1-2. — С. 11-36.
- [Нариньяни, 2003] *Нариньяни А.С.* НЕ-факторы: неоднозначность (доформальное исследование) // Новости искусственного интеллекта. – 2003 – № 5, № 6.
- [Поспелов, Осипов, 2002] *Поспелов Д.А., Осипов Г.С.* Введение в прикладную семиотику. Глава 5. Операции в семиотических базах знаний //Новости искусственного интеллекта. – 2002 – № 6 – с. 29-35.
- [Прудков, 2004] *Прудков П.* Парадоксы искусственного интеллекта [http://www.aicomunity.org/articles\\_list.php](http://www.aicomunity.org/articles_list.php)
- [Псих. Процессы, 2004] Психические процессы <http://azps.ru/articles/proc/proc29.html>
- [Ротенберг, 1999] *В. П.Ротенберг В. П.* Мозг и две стратегии мышления: парадоксы и гипотезы [http://metaphor.nsu.ru/misc/num1/num1\\_roten.htm](http://metaphor.nsu.ru/misc/num1/num1_roten.htm)
- [Солсо, 1996] *Солсо Р.Л.* Когнитивная психология. Москва: Тривола, 1996
- [Тарасов, 2002] *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – Москва: Эдиториал УРЭС, 2002.

---

### Информация об авторах

---

**Валькман Юрий** – Международный научно-учебный Центр информационных технологий и систем, зав. отделом; Украина, 03680, Киев–680, МСП, просп. Академика Глушкова, 40; e-mail: [yur@valkman.kiev.ua](mailto:yur@valkman.kiev.ua)

**Быков Вячеслав** – Международный научно-учебный Центр информационных технологий и систем, аспирант; Украина, 03680, Киев–680, МСП, просп. Академика Глушкова, 40; e-mail: [yur@valkman.kiev.ua](mailto:yur@valkman.kiev.ua)

## МОДЕЛИ БИОРИТМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Степан Г. Золкин

**Abstract:** *Models of associative connections of functional sites of a bark of a brain of the person are described during processing the touch information.*

**Keywords:** *a robotics, models, associative connections.*

---

### Введение

---

Одним из основных направлений развития робототехники является возможность придания роботам навыков и умений человека, способностей к суждениям с последующим вытеснением или совершенствованием уже существующей технологии. Решение этих задач требует наличия математических моделей изучаемых явлений, позволяющих применять количественные методы исследования и оценивания.

Необходимость применения робототехнических систем в производстве диктуется, в основном, следующими причинами: энергетические затраты или условия выполнения работы неприемлемы для человека; выполнение операции вручную не обеспечивает требуемого качества; экономическая целесообразность внедрения в производство более совершенных технологий. Для успешного функционирования робототехнических систем выдвигаются общие требования моделирования, перспективного планирования и оперативного управления в реальном масштабе времени. Восприятие и интерпретация данных об окружающей обстановке играют важнейшую роль при управлении действиями

адаптивного робота [1]. Основные функции сенсорной системы человека и животных состоят в обеспечении возможности обнаружения, различения и опознания сигналов внешнего мира, т.е. формировании сенсорных образов. В свою очередь, реализация этих функций приводит к определенному состоянию и (или) двигательному поведению живого организма. При этом оценка своего поведения и поведения внешних объектов является основой мышления. Выделение полезной информации из сигналов датчиков технического осязания и ее обработка способны дать роботам возможность собирать, оценивать и анализировать данные об окружающей среде в рамках функциональных моделей интеллектуальных систем, поведенчески аналогичных человеку [1].

Постановка задачи. Целью работы является создание математических моделей, пригодных для прогноза реакции интеллектуальной системы робота при восприятии и интерпретации различной информации – световой, звуковой, концентрационной (запаховой), а также определение возможности использования полученных моделей для увеличения скорости этой реакции. Для реализации поставленной задачи используется система регрессионных полиномов, характеризующая активацию различных участков коры головного мозга человека, направленность и степень взаимодействия между участками коры, межполушарную функциональную асимметрию и межполушарные связи участков коры, возникающие под влиянием различных внешних раздражителей.

---

### Основная часть

---

Сенсорная система человека – это совокупность вспомогательных образований, рецепторов, нервных путей и центров, раздражение которых приводит к появлению специфического чувства, характерного для данной сенсорной модальности, т.е. для данного типа раздражителя. Сенсорная система выступает как определенная локализованная анатомическая система, выполняющая специализированную функцию обнаружения и преобразования информации в нервный код, в котором заключена совокупность описания признаков воспринимаемого объекта или явления. В настоящее время основные данные по физиологии сенсорных систем получены с помощью двух методов – психофизического и электрофизического. Первый из них дает представление о работе сенсорной системы в целом, второй выявляет аналитические данные о работе больших совокупностей или одиночных структурных элементов, составляющих сенсорные системы. Кроме этих подходов данные о деятельности сенсорных систем получены с помощью других аналитических методов: биохимических, фармакологических и морфологических (например, установление системы связей между сенсорными центрами). При этом все перечисленные выше методы направлены на выяснение двух главных вопросов: а) каковы возможности сенсорной системы при формировании сенсорных образов и их опознании; б) какая обработка информации о внешнем сигнале происходит в сенсорной системе для этого опознания. Согласно физиологическим данным за обработку информации, поступающей от сенсорных систем и реализацию функций сознания, речи, мышления (понимания и манипулирования понятиями), памяти (включая процессы обучения), эмоций у человека отвечают структуры, локализованные главным образом в новой коре головного мозга (неокортексе). Процесс формирования новой коры связан с представительством всей совокупности сенсорных систем. Характерной чертой корковой проекции сенсорных систем является их множественный характер представительства в коре. Разграничивают первичные, вторичные и третичные проекции. Первичные проекции являются окончанием быстропроводящих сенсорных каналов и отвечают за прием и обработку сигнальной информации. Они имеют достаточно определенные границы в пределах неокортекса. Первичные корковые зоны окружены вторичными зонами той же сенсорной системы, которые принимают интегрированную информацию. Вторичные корковые поля не имеют прямой связи с периферией, в них осуществляется переработка информации и ее сравнение с ранее накопленной информацией (памятью), что определяет приобретенный опыт. Вторичные корковые поля отвечают за гнозис (способность к узнаванию полученной информации по чувственным восприятиям на основе опыта, практики, навыка) и праксис (действия различной степени сложности, выработанные на основе опыта, навыка, практики и закрепленные стереотипом). Наконец, выделяют зоны перекрытия разных сенсорных систем, где происходит межсенсорное взаимодействие – третичные зоны или ассоциативные поля [2]. Они обеспечивают сложные виды деятельности: программирование действий, поведение, индивидуальные характеристики человека. Выявление связей между перечисленными зонами, возникающих в процессе

приема и обработки сенсорной информации, может способствовать созданию требуемых математических моделей. Расположение долей коры головного мозга и корковых полей в них показано на рисунке 1 [4].

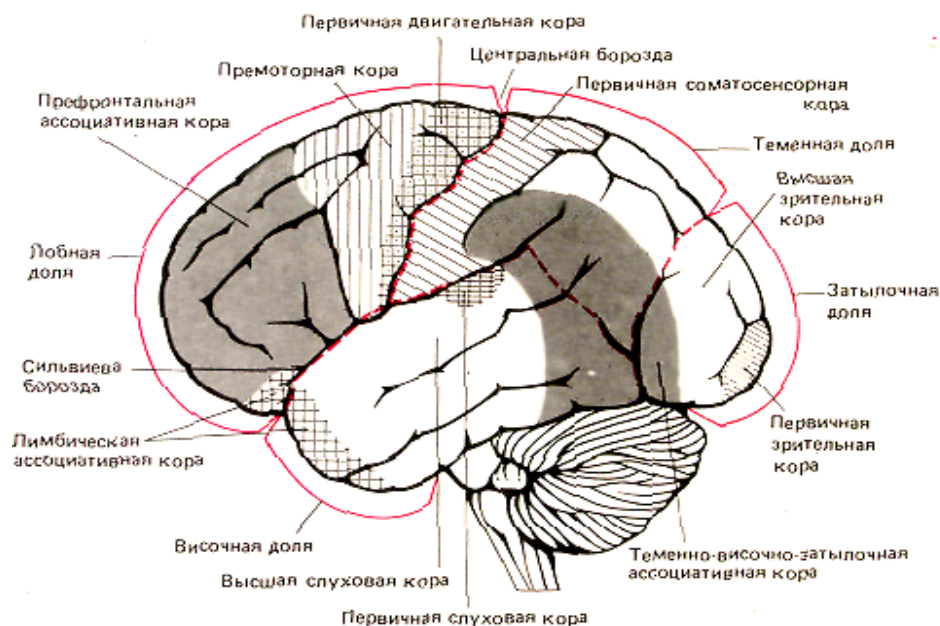


Рис. 1

В свою очередь первичные, вторичные и третичные зоны включают в себя корковые поля, отличающиеся по своему строению и функциональности. На основе особенностей строения коры и с учетом данных цито-, миело-, глио- и ангиоархитектоники в ней выделяют 11 областей, включающих 52 поля. Цитоархитектоническая карта коры головного мозга человека по Бродману [4] с обозначением цифрами и выделением специальными символами различных полей приведена на рисунке 2 (для левого полушария), на рисунке 3 (для правого полушария).

Таким образом, к первичным корковым полям относятся: зрительное поле – 17; слуховые поля – 41, 42; обонятельное поле – 11; соматосенсорные поля – 1, 2, 3; моторное поле – 4 (в нем имеется четкая топографическая проекция мышц тела, обеспечивающих наиболее точные и разнообразные движения). К вторичным корковым полям относятся: зрительные – 18, 19; слуховые – 21, 22; обонятельное – 12; соматосенсорные – 5, 7; моторное – 6 (осуществляет высшие двигательные функции, связанные с планированием и координацией произвольных движений). К третичным корковым зонам относятся поля лобной области – 8-12, 32, 33, 44-47, а также теменные поля – 30, 31, 39, 40. Сигнальное значение имеют все сенсорные стимулы, но способностью опережающего воздействия обладают зрительные и слуховые, а также обонятельные сигналы. Рассмотрим группы полей, относящихся к этим сигнальным системам.

Зрительная сигнализация для человека обладает наибольшей физиологической силой (около 80% информации о внешнем мире), поэтому степень кортикализации зрительной системы очень высока. Первичная зрительная кора находится в поле 17 (рис. 2, 3), вторичные поля – 18 и 19, кольцеобразно окружают первичную зону. Информация о форме, цвете, движении, удаленном расположении объектов обрабатывается частями зрительной системы как последовательно, так и параллельно. Наиболее сложные объекты обрабатываются в ассоциативных областях мозга – третичные поля 30, 31, 33, 39, 40, 45, 46 (рис. 1,2,3), с подключением процессов внимания и памяти. На высших уровнях зрительной системы параллельно функционируют две системы анализа: одна определяет место предмета в пространстве, другая описывает его признаки. Когда конечные результаты последовательных и параллельных процессов интегрируются, возникает законченный зрительный образ окружающего мира.

Первичная слуховая кора находится в полях 41, 42. Эта зона обеспечивает механизмы непосредственного восприятия и дифференцировку звуков. Вторичная слуховая кора прилегает снизу к зоне первичной проекции – в поле 22, частично 21. Наиболее сложные сигналы речевой системы обрабатываются в третичных лобных полях 44-47.

Обоняние – первое чувство, появившееся в процессе эволюции, самый древний вид сенсорной реакции. Оно функционирует в тесном взаимодействии с другими сенсорными системами, обеспечивая ориентировку организма в пространстве. Основные поля обонятельной коры: переднее обонятельное ядро (первичная обонятельная кора – частично поле 11); грушевидная кора – играет главную роль в различении запахов (вторичная обонятельная кора – частично поле 12) [3].

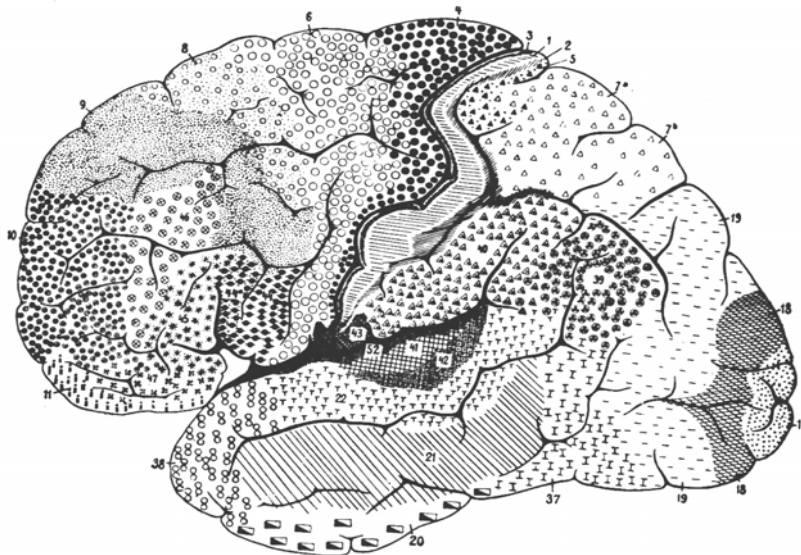


Рис. 2

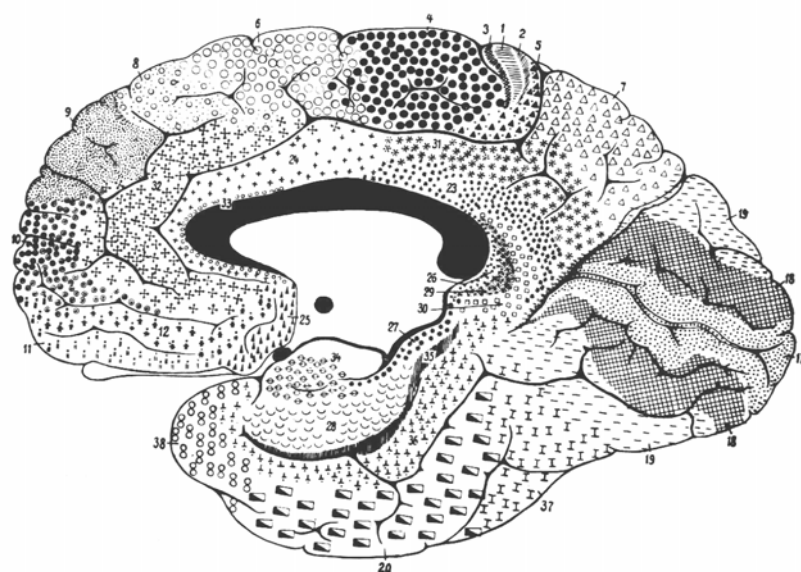


Рис. 3

Переработанная различными вторичными корковыми полями информация интегрируется в ассоциативных зонах (третичных полях) неокортекса. Классические сенсорные системы со всей сложностью их мозговых конструкций не способны обеспечить функцию опознания сигналов. Они выполняют сложные процессы описания сигналов, осуществляя операцию кодирования информации. Операция опознания сигнала, т.е. отнесения его к определенному классу сигналов, записанному в аппаратах памяти, требует дополнительного участия ассоциативных структур мозга. С помощью этих структур сигнал оценивается как интегрированное целое, несущее значимую информацию для деятельности организма – выполняется операция декодирования. Происходит селективный отбор одних видов информации с одновременным сопряженным торможением других сенсорных влияний. Важнейшая

интегративная часть мозга – лобная доля, регулирующая программное обеспечение речи и движений тела. По ряду признаков архитектурные поля лобной области образуют ассоциативные зоны – поля 8-12, 32, 44-47. Длинные ассоциативные волокна связывают лобную область со всеми другими отделами коры, что создает условия для интегрирования информации. Фронтальные области коры также отвечают за гашение ориентировочных реакций. Теменная кора является высшим центром формирования в мозге «схемы тела», являющейся уровнем отсчета координат внешнего пространства. Нижние теменные поля имеют наиболее тесное отношение к организации тонкодифференцированных предметных действий, реализация которых возможна только на основе зрительного контроля и ориентировки в пространстве. Поля 39 и 40, возможно 37, занимают переходную зону, соединяющую тактильную вторичную корковую зону с вторичными зрительными и слуховыми полями. Предполагается, что тактильная, вестибулярная, зрительная и слуховая информация, обработанная во вторичных зонах, интегрируется на высшем уровне в 39 и 40 полях [2]. Необходимо учитывать, что правое и левое полушария выполняют разные функции, но совместно обеспечивают целенаправленное поведение. Правое полушарие контролирует и регулирует сенсорно-моторные и двигательные функции левой половины тела (поля 4-12, 17-19, 30-33, 36), а левое – правой (поля 4-11, 17-19, 21, 22, 37, 39-42, 44-47). Каждое полушарие обладает собственными ощущениями, восприятием, мыслями и идеями, характеризуется разной эмоциональной оценкой идентичных событий, располагает собственной цепью воспоминаний и усвоенных знаний, не доступных другому полушарию. В определенных отношениях каждое полушарие имеет преобладающее мышление: левое – речевое (поля 41-47), правое – зрительно-пространственное (поля 17-19, 30, 31, 37). Левое полушарие обрабатывает информацию аналитически и последовательно, правое – одновременно и целостно. Хотя левое полушарие отвечает за язык и речь, правое управляет пониманием и навыками, связанными с пространственным и зрительным восприятием, оно обладает способностью понимать речь, но не может ее программировать (поле 36). Левое и правое полушария в равной степени способны к распознаванию стимулов внешнего мира, но пользуются разными способами или стратегиями решения задачи и имеют разные возможности в выражении результатов решения: языковую – для левого полушария и пространственно-зрительную – для правого. В интактном мозге полушария взаимодействуют и обуславливают приспособляемость человека к окружающим условиям среды, пластичность его поведения, обеспечивая целостное восприятие внешнего мира и самого себя [2], [3].

Таким образом, все сенсорные системы построены по принципу билатеральной симметрии. Основным механизмом парной деятельности сенсорной системы является механизм функциональной асимметрии при действии различным образом локализованных в пространстве объектов. Парная деятельность сенсорных систем заключается в сравнении пространственной модели ранее действовавшего стимула с новой пространственной локализацией того же стимула. Система связей между ассоциативными полями обеспечивает тесное единство обеих половин ассоциативной системы и создает высокую надежность ее функционирования [2]. Кроме того, при всем многообразии структур и связей общими принципами организации при обработке информации в неокортексе являются принцип конвергенции – существования морфологически обусловленных многочисленных связей от нейронов различных модальностей, заканчивающихся на одном нейроне, и принцип дивергенции – многочисленных параллельных связей от одного нейрона ко многим другим за счет коллатералей. Принципы конвергенции и дивергенции обеспечивают дублирование передачи информации, что характерно для большинства афферентных систем, а также возможность срочной и многоступенчатой передачи информации. Срочные пути служат для передачи сигнала о наличии раздражающего воздействия, а многоступенчатые пути с большим числом конвергентных связей несут более полную информацию о раздражающем стимуле. В высших отделах центральной нервной системы (неокортексе) происходит сопоставление поступающей афферентной информации о воздействии стимула с ответной эфферентной реакцией на наступающее раздражение (эфферентная копия). Эти копии заранее сообщают о предполагаемой мышечной активности и о создаваемом ею движении. Они могут служить для устранения неоднозначности афферентной информации. Целостная сенсорная функция мозга обеспечивается содружественной деятельностью сенсорных, моторных и ассоциативных систем и направлена на организацию адаптивных движений и действий. Любая психофизическая функция зависит от одновременной работы нескольких сенсорных систем, то есть является полисенсорной и поэтому ее оценка не может быть локализована в ограниченных отделах мозга. Наиболее полная сигнальная значимость фактора окружающего пространства может реализовываться с участием тех структур мозга, куда приходит информация

о факторах среды, разных по сенсорным качествам (модальности сигнала), то есть по механизму одновременного гетеросенсорного сопоставления. Значит, степень совершенства интегративной деятельности мозга тесно связана со структурной дифференциацией и функциональной специализацией ассоциативных мозговых систем. Таким образом, особая роль ассоциативных систем - в интеграции различных по физической природе (разномодальных) стимулов в единый сенсорный образ. Структура ассоциативных связей, возникающих между участками коры в ходе обработки различной информации, может быть использована при моделировании интеллектуальных систем.

В качестве одного из основных методов изучения механизмов обработки информации и управления поведением человека в настоящее время применяется электроэнцефалографическое исследование (ЭЭГ), результаты которого позволяют делать заключения о состоянии коры головного мозга и процессах, протекающих в ней (реакции пробуждения, активации, торможения и т.д.). При электроэнцефалографическом исследовании измеряют уровни сигналов следующих основных ритмов ЭЭГ:  $\delta$ -ритм (1-4 Гц),  $\theta$ -ритм (4-8 Гц),  $\alpha_1$ -ритм (8-13 Гц),  $\alpha_2$ -ритм (9-11 Гц),  $\beta_1$ -ритм (13-20 Гц),  $\beta_2$ -ритм (20-30 Гц). Согласно физиологическим данным регистрация сигналов  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ -ритмов свидетельствует об активации исследуемого участка неокортекса в процессе приема и обработки сигнальной информации. Основные точки расположения контрольных датчиков отвечают нормам международной системы «10-20», в которой соответствие между положениям каждого датчика с анатомическими структурами и областями коры головного мозга точно установлено рентгенологически, определены исходные точки отсчёта, учтена вариабельность анатомических структур, а также размеров и формы черепа. Точки расположения датчиков соответствуют тем областям мозга, на которые они проецируются: лобная – Fp1, Fp2 (frontalis), центральная - C3, C4 (centralis), затылочная - O1, O2 (occipitalis), височная - T3, T4 (temporalis), нечетные индексы соответствуют левым долям мозга, а четные – правым [5]. Соответствие проекций точек расположения датчиков полям неокортекса и краткая характеристика функциональности этих полей приведены в таблице 1.

Таблица 1

точки расположения датчиков	Fp1	Fp2	C3	C4	O1	O2	T3	T4
j	1	2	3	4	5	6	7	8
поля коры	45-47	11, 12, 32	4, 6	4	18, 19	17	41,42	36
Функцио- нальные характеристики полей	Ассоциа- тивная кора	Ассоциа- тивная зона, первич. и вторич. обонят. поля	первич.и вторич. моторн. поля	первич. моторн. поле	вторич. зрит. поле	первич. зрит. поле	первич. слух. поле	вторич. слух. поле

С целью выявления статистических связей между полями неокортекса, возникающих в процессе приема и обработки сигнальной информации, был проведен эксперимент по регистрации биоэлектрической активности коры головного мозга человека при воздействии различных внешних раздражителей с применением метода ЭЭГ. В результате последующей обработки данных методом статистического корреляционно-регрессионного анализа, выявлении статистически значимых связей с учетом погрешностей измерения была получена система регрессионных полиномов линейного вида (1):

$$y_{ij}^p = \sum_{m=1}^7 b_{mj} y_{mj} + \sum_{n=1}^9 b_{in} y_{in} + \sum_{p=1}^4 b_p x_p \quad (1)$$

где  $x_p$  - применяемый фактор внешнего воздействия;

$y_{ij}^p$  – значение уровня сигнала i-го ритма (таблица 2) на j-ом датчике (таблица 1) при применении p-го фактора;

$y_{mj}$  – значение уровня сигнала m-го ритма на j-ом датчике при применении p-го фактора;

$y_{in}$  – значение уровня сигнала i-го ритма на n-ом датчике при применении p-го фактора;

$b_{mj}, b_{in}, b_p$  – оценки значений коэффициентов регрессии;

Таблица 2.

i	1	2	3	4	5	6	7
регистрируемый ритм	$\delta$ (1-4Гц)	$\theta$ (4-8Гц)	$\alpha 1$ (8-13Гц)	$\beta 1$ (13-20Гц)	$\beta 2$ (20-30Гц)	$\alpha 2$ (9-11Гц)	среднее (1-30Гц)

Таблица 3.

p	1	2	3	4
фактор внешнего воздействия	зрительный	слуховой	запаховый	комплекс всех раздражителей

В качестве статистических моделей выделены полиномы (2) – (16), отражающие распределение энергии сигналов  $\beta 1$  и  $\beta 2$ -ритмов по участкам коры в зависимости от видов воздействия:

$$y_{45}^1 = -0.0868 y_{15} - 0.1013 y_{25} - 0.1169 y_{35} + 0.2501 y_{55} - 0.0280 y_{65} + 0.5973 y_{75} - 0.1573 y_{42} - 0.2371 y_{44} + 0.0802 y_{46} - 0.3959 y_{48} + 1.6981 y_{49} - 0.0058 x_1 \quad (2)$$

$$y_{46}^1 = -0.1269 y_{16} - 0.1096 y_{26} - 0.2665 y_{36} + 0.1962 y_{56} - 0.0201 y_{66} + 0.9327 y_{76} - 0.4376 y_{41} - 0.2139 y_{42} - 0.5018 y_{43} + 0.1190 y_{45} - 0.2912 y_{47} + 2.0833 y_{49} - 0.0096 x_1 \quad (3)$$

$$y_{47}^1 = -0.3530 y_{17} - 0.3765 y_{27} - 0.4188 y_{37} - 0.1568 y_{57} - 0.0287 y_{67} + 1.9787 y_{77} + 0.2827 y_{41} + 0.1660 y_{43} - 0.0449 y_{44} + 0.0471 y_{45} - 0.1424 y_{46} - 0.3573 y_{48} + 0.8419 y_{49} - 0.0008 x_1 \quad (4)$$

$$y_{45}^2 = -0.1469 y_{15} - 0.2047 y_{25} - 0.2946 y_{35} + 0.2541 y_{55} - 0.0266 y_{65} + 1.0785 y_{75} - 0.6463 y_{41} - 0.2599 y_{44} - 0.1788 y_{47} + 2.2187 y_{49} + 0.0156 x_2 \quad (5)$$

$$y_{46}^2 = -0.1878 y_{16} - 0.2209 y_{26} - 0.4304 y_{36} + 0.1119 y_{56} - 0.0330 y_{66} + 1.5050 y_{76} - 0.1721 y_{41} - 0.1113 y_{42} - 0.2702 y_{43} + 0.0579 y_{44} + 0.0613 y_{45} - 0.3504 y_{47} - 0.2481 y_{48} + 1.9117 y_{49} + 0.0021 x_2 \quad (6)$$

$$y_{47}^2 = -0.2539 y_{17} - 0.2854 y_{27} - 0.3164 y_{37} + 1.4045 y_{77} + 0.1629 y_{43} - 0.0795 y_{44} - 0.1156 y_{45} - 0.0864 y_{46} - 0.2577 y_{48} + 1.3507 y_{49} + 0.0177 x_2 \quad (7)$$

$$y_{57}^2 = -0.2438 y_{17} - 0.3136 y_{27} - 0.3538 y_{37} - 0.0454 y_{47} + 0.0319 y_{67} + 1.4057 y_{77} + 0.7053 y_{51} - 0.2203 y_{52} + 0.2659 y_{53} - 0.3678 y_{54} - 0.3161 y_{58} + 0.7690 y_{59} - 0.0046 x_2 \quad (8)$$

$$y_{45}^3 = -0.2022 y_{15} - 0.2056 y_{25} - 0.4028 y_{35} - 0.0060 y_{65} + 1.4005 y_{75} - 0.2292 y_{41} - 0.2623 y_{42} - 0.2062 y_{43} - 0.2133 y_{44} + 0.0705 y_{46} - 0.3771 y_{48} + 2.0083 y_{49} + 0.0066 x_3 \quad (9)$$

$$y_{46}^3 = -0.1562 y_{16} - 0.1729 y_{26} - 0.4146 y_{36} + 0.3302 y_{56} - 0.0065 y_{66} + 1.2803 y_{76} - 0.4252 y_{41} - 0.1288 y_{42} - 0.0763 y_{43} - 0.0380 y_{44} + 0.0272 y_{45} - 0.3261 y_{47} + 1.9482 y_{49} + 0.0033 x_3 \quad (10)$$

$$y_{47}^3 = -0.2930 y_{17} - 0.3014 y_{27} - 0.3417 y_{37} + 0.2188 y_{57} - 0.0226 y_{67} + 1.6427 y_{77} - 0.1419 y_{42} + 0.2506 y_{43} - 0.1542 y_{46} - 0.1459 y_{48} + 0.8199 y_{49} - 0.0062 x_3 \quad (11)$$

$$y_{55}^3 = -0.0137 y_{15} - 0.0747 y_{25} - 0.1052 y_{35} - 0.0066 y_{45} - 0.0085 y_{65} + 0.4479 y_{75} - 0.4321 y_{51} + 0.2487 y_{52} - 0.0725 y_{53} - 0.0322 y_{54} + 0.3018 y_{56} + 0.1452 y_{57} - 0.0107 y_{58} + 0.3894 y_{59} - 0.0001 x_3 \quad (12)$$

$$y_{57}^3 = -0.2465 y_{17} - 0.2714 y_{27} - 0.3271 y_{37} + 1.3579 y_{77} + 0.4390 y_{51} - 0.1787 y_{52} + 0.2493 y_{53} - 0.2324 y_{54} - 0.0576 y_{56} - 0.2367 y_{58} + 0.8937 y_{59} - 0.0042 x_3 \quad (13)$$

$$y_{45}^4 = -0.1124 y_{15} - 0.1305 y_{25} - 0.1737 y_{35} + 0.2421 y_{55} - 0.0175 y_{65} + 0.7332 y_{75} - 0.1310 y_{41} - 0.1109 y_{42} + 0.0344 y_{43} - 0.2359 y_{44} + 0.1037 y_{46} - 0.3347 y_{48} + 1.6722 y_{49} + 0.0020 x_4 \quad (14)$$

$$y_{46}^4 = -0.1343 y_{16} - 0.1280 y_{26} - 0.2916 y_{36} + 0.2198 y_{56} - 0.0144 y_{66} + 0.9937 y_{76} - 0.4756 y_{41} - 0.1888 y_{42} - 0.3439 y_{43} + 0.0909 y_{45} - 0.3253 y_{47} + 2.0698 y_{49} + 0.0110 x_4 \quad (15)$$

$$y_{47}^4 = -0.2955 y_{17} - 0.3188 y_{27} - 0.3354 y_{37} - 0.0267 y_{67} + 1.6337 y_{77} + 0.1906 y_{41} + 0.2027 y_{43} - 0.0656 y_{44} - 0.1308 y_{46} - 0.3108 y_{48} + 0.9604 y_{49} - 0.0085 x_4 \quad (16)$$

Значения статистических оценок полиномов (2) – (16) приведены в таблице 4.

Таблица 4.

№ полинома	$S_{1z}^2$	F1	R	№ полинома	$S_{1z}^2$	F1	R
2	0.14179	7.07129	0.85858	9	0.14571	6.91244	0.85533
3	0.18462	5.43081	0.81587	10	0.17576	5.73051	0.82550
4	0.19873	5.04513	0.80179	11	0.17387	5.79279	0.82737
5	0.16198	6.21701	0.83915	12	0.19335	5.20908	0.80803
6	0.19625	5.13148	0.80512	13	0.16494	6.10651	0.83624
7	0.19543	5.15296	0.80594	14	0.14736	6.79649	0.85287
8	0.16239	6.20151	0.83875	15	0.18389	5.44612	0.81638
				16	0.19827	5.05117	0.80203

Поскольку полиномы (2) – (16) описывают процесс генерации биоэлектрической активности полей неокортекса в диапазоне  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ -ритмов, то они отражают статические ассоциативные связи, возникающие между функциональными участками коры под влиянием внешних воздействий. Сила и направленность этих связей характеризуется знаками и величинами оценок значений коэффициентов регрессии  $b_{ij}$  и значений t-критерия значимости для каждой оценки.

Из анализа полученных данных можно сделать следующие выводы: в процессе получения и обработки сенсорной информации корой головного мозга статические ассоциативные связи возникают при участии всех исследуемых образований неокортекса, т.е. обработка внешнего сигнала любой модальности происходит с использованием возможностей всех полей, независимо от их функциональности.

### Заключение

Статистическое моделирование реакций новой коры головного мозга человека на внешние раздражители, отраженное полученными регрессионными полиномами, определяет научную новизну данной работы, т.е. позволяет прогнозировать реакцию человека, перенося ее на адекватное поведение интеллектуальных систем и роботов. Практическое значение данной работы заключается в том, что закономерности совместной работы функциональных полей неокортекса в процессе восприятия и обработки сигнальной информации, отраженные регрессионными полиномами (2) – (16), могут быть использованы при прогнозировании формирования ассоциативных связей в коре головного мозга человека, что может быть учтено при построении систем технического оцувствления робота.

### Список литературы

1. Ш. Ноф. Справочник по промышленной робототехнике. – М.: Машиностроение, 1989.
2. Н.П. Бехтерева и другие. Механизмы деятельности мозга человека. – Л.: Наука, 1988.
3. Я.А. Альтман и другие. Физиология сенсорных систем. – С-Петербург.: Паритет, 2003.
4. Р. Шмидт, Г. Тевс. Физиология человека. В 3-х томах. – М.: МИР, 1996.
5. Н.М. Жадин. Биофизические механизмы формирования электроэнцефалограммы - М.: Наука, 1984.

### Информация об авторе

**Золкин Степан Георгиевич** – специалист сектора биофизических исследований мозга человека, Донецкий институт проблем искусственного интеллекта, 83050, Украина, г. Донецк, пр. Б. Хмельницкого, 84, ИПИИ