

УДК: 577.38; 004.81

Динамическая теория информации как базис естественно-конструктивистского подхода к моделированию мышления

О. Д. Чернавская

Физический институт Академии наук,
Россия, 119333, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 53

E-mail: olgadmitcher@gmail.com

Получено 18.03.2017, после доработки — 19.04.2017.

Принято к публикации 31.05.2017.

Рассматриваются основные положения и выводы динамической теории информации (ДТИ). Показано, что ДТИ дает возможность выявить два существенно важных типа информации: объективную (безусловную) и субъективную (условную). Выделяется два способа получения информации: рецепция (восприятие уже существующей информации) и генерация информации (производство новой). Показано, что процессы генерации и рецепции информации должны происходить в двух разных подсистемах одной когнитивной системы. Обсуждаются основные положения естественно-конструктивистского подхода к моделированию мышления. Показано, что любой нейроморфный подход сталкивается с проблемой «провала в описании «Мозга» и «Разума»», т. е. провала между объективно измеримой информацией об ансамбле нейронов («Мозг») и субъективной информацией о сознании человека («Разум»). Обсуждается естественно-конструктивистская когнитивная архитектура, разработанная в рамках данного подхода. Она представляет собой сложную блочно-иерархическую комбинацию, собранную из разных нейропроцессоров. Основная конструктивная особенность этой архитектуры состоит в том, что вся система разделена на две подсистемы (по аналогии с полушариями головного мозга). Одна из подсистем отвечает за восприятие новой информации, обучение и творчество, т. е. за генерацию информации. Другая подсистема отвечает за обработку уже существующей информации, т. е. рецепцию информации. Показано, что низший (нулевой) уровень иерархии представлен процессорами, которые должны записывать образы реальных объектов (распределенная память) как отклик на сенсорные сигналы, что представляет собой объективную информацию (и относится к «Мозгу»). Остальные уровни иерархии представлены процессорами, содержащими *символы* записанных образов. Показано, что символы представляют собой *субъективную* (условную) информацию, создаваемую самой системой и обеспечивающую ее индивидуальность. Совокупность высоких уровней иерархии, содержащих символы абстрактных понятий, дает возможность интерпретировать понятия «сознание», «подсознание», «интуиция», относящиеся к области «Разума», в терминах ансамбля нейронов. Таким образом, ДТИ дает возможность построить модель, позволяющую проследить, как на основе «Мозга» возникает «Разум».

Ключевые слова: информация, когнитивный процесс, образ, символ, нейропроцессор, шум, принцип почернения связей, вербализация, борьба условных информаций

UDC: 577.38; 004.81

Dynamical theory of information as a basis for natural-constructive approach to modeling a cognitive process

O. D. Chernavskaya

Lebedev Physical Institute,
Leninsky Ave 53, Moscow, 119333, Russia

E-mail: olgadmitcher@gmail.com

*Received 18.03.2017, after completion — 19.04.2017.
Accepted for publication 31.05.2017.*

The main statements and inferences of the Dynamic Theory Information (DTI) are considered. It is shown that DTI provides the possibility to reveal two essentially important types of information: objective (unconventional) and subjective (conventional) information. There are two ways of obtaining information: reception (perception of an already existing one) and generation (production of new) information. It is shown that the processes of generation and perception of information should proceed in two different subsystems of the same cognitive system. The main points of the Natural-Constructivist Approach to modeling the cognitive process are discussed. It is shown that any neuromorphic approach faces the problem of Explanatory Gap between the “Brain” and the “Mind”, i. e. the gap between objectively measurable information about the ensemble of neurons (“Brain”) and subjective information about the human consciousness (“Mind”). The Natural-Constructive Cognitive Architecture developed within the framework of this approach is discussed. It is a complex block-hierarchical combination of several neuroprocessors. The main constructive feature of this architecture is splitting the whole system into two linked subsystems, by analogy with the hemispheres of the human brain. One of the subsystems is processing the new information, learning, and creativity, i.e. for the generation of information. Another subsystem is responsible for processing already existing information, i.e. reception of information. It is shown that the lowest (zero) level of the hierarchy is represented by processors that should record images of real objects (distributed memory) as a response to sensory signals, which is objective information (and refers to the “Brain”). The next hierarchy levels are represented by processors containing symbols of the recorded images. It is shown that symbols represent subjective (conventional) information created by the system itself and providing its individuality. The highest hierarchy levels containing the symbols of abstract concepts provide the possibility to interpret the concepts of “consciousness”, “sub-consciousness”, “intuition”, referring to the field of “Mind”, in terms of the ensemble of neurons. Thus, DTI provides an opportunity to build a model that allows us to trace how the “Mind” could emerge basing on the “Brain”.

Keywords: information, cognitive process, image, symbol, neuroprocessor, noise, principle of blackening of connections, verbalization, struggle of conventional information

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 433–447 (Russian).

1. Введение

Проблема моделирования процесса мышления относится к числу наиболее фундаментальных и актуальных проблем XX, и XXI веков (см., например, [Turing, 1950]; Penrose, 1994). Наиболее широко известны работы в области искусственного интеллекта (ИИ), глобальной целью которых является создание искусственных систем, способных решать некоторые когнитивные задачи *лучше* (надежнее, эффективнее, быстрее, логичнее), чем человек (см. [Жданов, 2015] и ссылки там же). Однако в последнее время приоритеты сдвигаются. Наиболее актуальной становится задача моделирования именно человеческого мышления, с присущими именно ему свойствами (индивидуальность, непредсказуемость, интуиция, эмоциональность).

Существует множество подходов к проблеме моделирования когнитивного процесса [Шамис, 2006; Жданов, 2015; Laird, 2012; Samsonovich, 2007; LeCun, Bengio, Hinton, 2015; Koziol, Budding, 2009; Doya, 2000; Vershure, 2012; Izhikevich, Edelman, 2008]. Однако любая нейроморфная модель неизбежно сталкивается с так называемой проблемой провала в описании «Мозга» и «Разума» (“Explanatory Gap between Brain and Mind”) [Levin, 1983]. Имеется в виду, что в настоящее время нейробиология накопила множество информации (как теоретической, так и экспериментальной) о «Мозге» — о свойствах нейронов, их структуре и взаимодействии. Причем эти данные объективны и измеряемы. С другой стороны, психология и философия накопили множество соображений о «Разуме» — о сознании, самосознании, логике и т. д. Эти построения менее объективны и измерению не поддаются. Но каким образом можно (и можно ли?) перебросить мост через «провал», т. е. понять, как в ансамбле нейронов само по себе рождается сознание? Это самый сложный вопрос, или, на современном языке, вызов (challenge). Проблема была сформулирована более 30 лет назад, но актуальна до сих пор.

Однако ответ должен быть очень простым, поскольку сознание возникает само по себе в голове каждого ребенка в первые годы жизни, причем у каждого оно индивидуально!

Ответ может быть найден, если вспомнить, что существует еще один объект, имеющий дуальную природу, т. е. имеющий как материальные, так и виртуальные свойства, «Информация». Отметим, что, несмотря на грандиозную роль, которую играет информация в современном мире, этот объект остается загадочным и непонятым до конца.

Начнем с того, что до сих пор не существует единого, непротиворечивого и содержательного определения информации. Определение типа «информация есть знание о предметах, явлениях, связях...» представляет собой тавтологию, поскольку знания и есть информация. Лучшее, на наш взгляд, определение предложил основатель кибернетики Норберт Винер [Wiener, 1948]: «Информация — это не материя и не энергия, информация есть информация». Однако это определение не проясняет проблему. Знаменитый Клод Шеннон [Weaver, Shannon, 1963], основатель современной теории коммуникаций, сделал очень много для развития технологии *передачи* информации. В частности, он вывел формулу для подсчета количества информации. Однако вопрос о том, как информация может *возникать*, остался открытым. Следует подчеркнуть, что эти проблемы в большой мере связаны с многогранностью понятия «информации», так что изучение ее требует междисциплинарного (синергетического) подхода.

В конце XX века в работах Ильи Пригожина [Prigogine, 1997] и Германа Хакена [Haken, 2000] была развита наука, получившая название «синергетика». В рамках синергетики в работах Д. С. Чернавского [Чернавский, 2004] была предложена и развита динамическая теория информации (ДТИ). Эта теория создавалась именно для того, чтобы попытаться понять проблему *происхождения* информации, жизни и мышления.

В последние годы нами разрабатывался естественно-конструктивистский подход к моделированию мышления, основанный, в частности, на ДТИ. В рамках этого подхода была предложена естественно-конструктивистская когнитивная архитектура (ЕККА), представляющая собой сложную иерархическую комбинацию нейропроцессоров. В данной работе будет показано, что ЕККА дает возможность провести виртуальную грань между «Мозгом» и «Разумом».

2. Основные элементы ДТИ

2.1. Определения и свойства различных типов информации

В основе ДТИ лежит определение информации, предложенное Генри Кастлером [Quastler, 1964]: «*Информация есть запомненный выбор одного варианта из множества возможных и подобных*». Это определение не противоречит остальным, но, в отличие от них, является наиболее конструктивным, поскольку содержит в себе конструктивные вопросы.

Кто делает выбор? В зависимости от ответа на этот вопрос можно выделить два существенно разных типа информации.

Объективная (безусловная) информация — выбор, сделанный Природой (Богом?), который отражается в устройстве материального мира. Фактически это законы физики, химии, биологии и т. д. Этот выбор в некотором смысле «лучший», поскольку Природа выбирала оптимальные решения, связанные с минимизацией энергетических затрат.

Субъективная (условная) информация — выбор, сделанный коллективом живых субъектов в результате их взаимодействия: общения, борьбы, договоренности, условности. Важнейшая особенность данного типа информации заключается в том, что данный выбор не обязан (а часто и *не может*) быть наилучшим (варианты часто *a priori* равноправны), но он должен быть сделан и принят в данном сообществе, тем самым обеспечивая его индивидуальность. Наиболее ярким примером может служить язык: невозможно сказать, какой язык лучше, русский или английский, но эта информация формирует индивидуальность соответствующего общества.

Подчеркнем, что понятие «условная информация» чрезвычайно важно для понимания процесса мышления. Она отражает не внешнее (материальное) воздействие на систему, она появляется в самой системе в результате ее собственной эволюции и *самоорганизации*. Забегая вперед, скажем, что та информация, которую создает ансамбль нейронов головного мозга в процессе развития личности, представляет еще один яркий пример субъективной информации.

Как делается выбор? В зависимости от способа выбора выделяется два источника происхождения информации.

Рецепция информации есть выбор, предопределенный (*навязанный*) извне. Фактически это соответствует термину «обучение с учителем». Следует заметить, что в этом процессе выбор фактически превращается в *отбор* нужной информации.

Генерация информации — свободный, т. е. не предопределенный извне, *случайный* выбор. Важно отметить, что генерация информации возможна *только в том случае*, если система находится в состоянии «перемешивающего слоя» [Колупаев, Чернавский, 1997; Чернавский, 2004], т. е. ведет себя квазихаотично. Иными словами, для генерации информации необходим элемент случайности (обычно для этого используется термин «шум»).

Одним из важнейших выводов ДТИ является следующий: процессы *сохранения* (запоминания, рецепции) и *создания* (генерации) *новой* информации *дуальны*, т. е. *альтернативны*. В частности, при возникновении новой информации старая может пострадать. Отсюда следует, что для выполнения обеих функций необходимо участие *двух подсистем*, дополняющих друг друга: одна, в которой информация возникает (генерируется), и другая, где она рецепцируется и сохраняется. В первой должны быть условия, необходимые для свободного (случайного) выбора: *перемешивающий слой* или *шум*; вторая должна быть детерминированной, т. е. свободной от случайных факторов

Отметим, что четкого, общепринятого и однозначного определения самого процесса мышления (равно как и информации) не существует. В рамках ДТИ естественно определить мышление как процесс, аккумулирующий все функции, связанные с информацией. В таком подходе мышление есть *самоорганизованный процесс записи (восприятия), сохранения (запоминания), кодирования, обработки, генерации, а также защиты и распространения «своей» условной информации*.

Заметим, что в рамках этого определения можно ответить и на вопрос о том, в чем конечная цель мыслительного процесса человека («в чем смысл жизни?»): это генерация, защита и распространение своей субъективной информации. Кроме данного субъекта, этого не сможет сделать никто.

Подчеркнем, что под *распространением* информации подразумевается способность формулировать и передавать информацию на принятом в данном сообществе языке, т. е. *вербализация* собственной информации. Владение языком позволяет, кроме того, воспринимать семантическое содержание вербальной (т. е. символической) информации, поступающей извне, т. е. получать семантические знания, а не только эпизодические (приобретаемые исключительно собственным сенсорным опытом).

2.2. Концепция информационной системы

В рамках ДТИ была введена концепция информационной системы, т. е. такой системы, которая была бы способна самостоятельно обеспечивать генерацию или рецепцию информации. Было показано, что такая система должна обладать следующими свойствами:

- система должна быть мультистационарна, т. е. должна иметь по крайней мере два устойчивых стационарных состояния;
- система должна уметь запоминать сделанный выбор, т. е. *обучаться*;
- для генерации информации система должна содержать случайный элемент (шум).

Наиболее близким к рассматриваемой проблеме примером информационной системы является нейропроцессор Хопфилда [Hopfield, 1982] в континуальном представлении. Этот процессор представляет так называемую распределенную память: каждому реальному объекту соответствует некий набор нейронов, называемый его образом. Модель такого нейропроцессора может быть записана в форме

$$\frac{dH_i(t)}{dt} = \frac{1}{\tau^H} \left[\{H_i - \beta_i \cdot (H_i^2 - 1) - H_i^3\} + \sum_{i \neq j}^n \Omega_{ij} \cdot H_j \right] \equiv \frac{1}{\tau^H} \left[\mathfrak{S}_H \{H_i, \beta_i\} + \sum_{i \neq j}^n \Omega_{ij} \cdot H_j \right], \quad (1)$$

где $H_i(t)$ — переменная, описывающая состояние i -го нейрона, его внутренняя динамика описывается функционалом $\mathfrak{S}_H \{H_i, \beta_i\}$, $i = 1 \dots n$; τ_i^H — характерное время его активации, β_i — параметр, определяющий порог возбуждения (регулирует степень готовности данного нейрона к активации, т. е. адресное *внимание*). Здесь стационарные состояния переменных H равны +1 (активное) и -1 (пассивное). Последнее слагаемое в этом уравнении описывает случайное самовозбуждение (шум), которое должно присутствовать только в системах, обеспечивающих генерацию информации.

Матрица связей между нейронами $\Omega_{ij}(t)$ заслуживает отдельного обсуждения. В оригинальной работе Хопфилда [Hopfield, 1982] такой нейропроцессор предлагался как инструмент обработки информации, т. е. распознавания уже выученных образов. Принцип обучения связей здесь соответствует фактически *отбору* нужных связей: все связи изначально сильные («черные»); в процессе обучения нужные связи остаются неизменными, а лишние отмирают по закону

$$\Omega_{ij}^{Hopf}(t) = \Omega_0 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2\tau^\Omega} \int_0^t [1 - H_i(t') \cdot H_j(t')] \cdot \zeta(t') \cdot dt' \right\}, \quad (2)$$

где Ω_0 и τ^Ω — параметры обучения, функция $\zeta(t)$ обеспечивает эффект плавного вымораживания «посторонних» связей; t — время обучения.

Генерация информации требует другого принципа обучения, предложенного Хеббом [Hebb, 1949] как инструмент *самоорганизации* системы. Этот принцип отвечает усилению новых (сгенерированных) связей между выбранными нейронами по закону

$$\Omega_{ij}^{Hebb}(t) = \frac{\Omega_0}{4\tau^\Omega} \cdot \int_0^t [H_i(t') + 1] \cdot [H_j(t') + 1] \cdot \zeta(t') \cdot dt', \quad (3)$$

где Ω_0 , как и в (2), — характерные величины этих связей; τ^Ω — характерное время обучения; t — время; функция $\zeta(t)$ здесь обеспечивает эффект «насыщения» (связи не могут усиливаться до бесконечности). Здесь связи Ω между *активными* нейронами ($H_i = +1$), изначально слабые, усиливаются («чернеют») в процессе обучения, формируя новый образ, а связи с невозбужденными нейронами ($H_i = -1$) остаются слабыми.

Отсюда следует естественный вывод: для *записи новой* информации необходимо использовать процессор Хопфилда со связями, обучаемыми по Хеббу (3), а для *сохранения* выученных образов — тот же процессор, но обучаемый по Хопфилду (2).

2.3. Процедура кодирования: формирование символа образа

В рамках ДТИ процедуре кодирования, т. е. формирования связки «образ \leftrightarrow символ», придается очень большое значение. Предполагается, что в живых системах символ (или *имя*) данного образа должен формироваться не на основе некоего детерминированного алгоритма, предполагающего максимальную эффективность данного процесса, а в результате *самоорганизации* самой системы. Иными словами, требуется другой процессор (например, типа Гроссберга [Grossberg, 1982]), обеспечивающий «свертку» цепочки нейронов, соответствующей данному образу, в один нейрон-победитель в результате их конкурентного взаимодействия. Схема такой процедуры представлена на рис. 1.

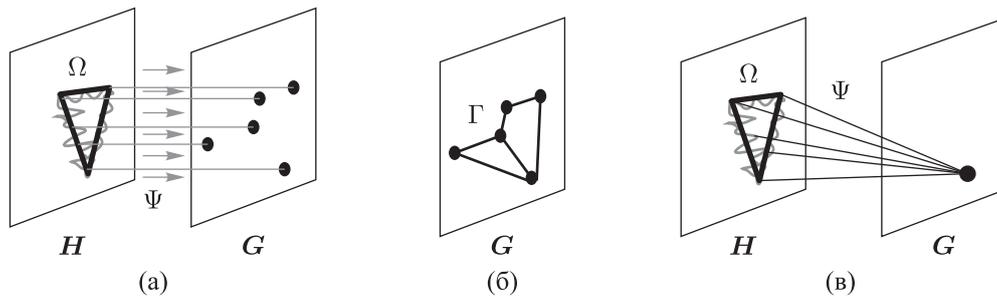


Рис. 1. Схема процедуры конверсии «образ \leftrightarrow символ»; а), б), в) этапы процедуры (см. пояснения в тексте). Обозначения: H — пластина типа Хопфилда (содержит образы); Ω — внутрислойные связи; G — пластина типа Гроссберга (обеспечивает выбор символа) благодаря конкурентным внутрислойным связям Γ ; Ψ — межслойные связи «символ \leftrightarrow образ»

Вначале (рис. 1, а) образ, записанный достаточно сильными («черными») связями Ω , подается (прямыми меж-слойными связями Ψ) на процессор следующего уровня иерархии G , т. е. активируется тот же набор нейронов, что и на «образной» пластине H .

Затем (рис. 1, б) процессор G обеспечивает нелинейное конкурентное взаимодействие нейронов, в результате которого из M нейронов выживает только один. Модель такого процессора можно представить в форме

$$\frac{dG_k(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_G} \left[\{ -(\alpha_k - 1) \cdot G_k + \alpha_k \cdot G_k^2 - G_k^3 \} - \sum_{l \neq k} \Gamma_{kl} \cdot G_k \cdot G_l \right] \equiv \frac{1}{\tau_G} \left[\mathfrak{F}_G \{ G_k, \alpha_k \} - \sum_{l \neq k} \Gamma_{kl} \cdot G_k \cdot G_l \right], \quad (4)$$

где G_k — переменная k -го формального динамического нейрона типа Гроссберга, функционал $\mathfrak{F}_G \{ G_k, \alpha_k \}$ описывает его внутреннюю динамику. Здесь стационарные состояния нейронов: активное $G = +1$ (активное) и $G = 0$ (пассивное). Параметры τ_G — характерное время активации, и α_k — порог активации (регулирует конкурентоспособность данного нейрона). Конкурентные (подавляющие) связи Γ_{kl} обучаются по закону

$$\frac{d\Gamma_{kl}(t)}{dt} = -\frac{\Gamma_0}{\tau_\Gamma} \{ G_k \cdot G_l (G_k - G_l) \}, \quad (5)$$

где τ^Γ — характерное время выбора победителя. Исследования модели в работе [Chernavskaya et al., 2013; Чернавская и др., 2014] показали, что в симметричном случае $\alpha_k(t=0) = \alpha$ и $\Gamma_{ik} = \Gamma_{kl} = \Gamma(t=0) = \Gamma_0$, процесс выбора символа *неустойчив*. Это значит, что нейрон-победитель выбирается *случайно*.

Наконец, на последнем этапе (рис. 1, в) межпластинные связи данного образа переключаются на единственный нейрон-победитель, обучаясь по Хеббовскому принципу

$$\frac{d\Psi_{ik}}{dt} = \frac{\Psi_0}{\tau^\Psi} \cdot G_k \cdot (H_i + 1). \quad (6)$$

Таким образом, реализуется парадигма Кохонена [Kohonen, 2001]: «победитель получает все». Новые сформированные межпластинные связи Ψ называются *семантическими*, поскольку именно они обеспечивают декомпозицию символа, т. е. его смысловое содержание.

Важно подчеркнуть: *какой именно* нейрон станет символом данного образа, заранее предсказать нельзя, это решает сама пластина в процессе выбора символа. Именно так обеспечивается *индивидуальность* искусственной системы. В этом смысле процесс формирования символа представляет собой процесс возникновения (генерации) *субъективной (условной)* информации в данной системе. Иными словами, символ есть не результат внешнего (сенсорного) воздействия на систему, а продукт развития самой системы, «молекула Разума», порожденная «Мозгом».

3. Основные положения ЕКП

ЕКП как инструмент для моделирования процесса мышления был предложен нами и развивался в работах [Chernavskaya et al., 2013, 2015; Чернавская и др, 2014; Чернавская, Чернавский, 2016; Chernavskaya, Rozhylo, 2016, 2017]. Напомним кратко основные положения.

3.1. Основы ЕКП

В основе ЕКП лежат ДТИ, данные нейрофизиологии и нейропсихологии, нейрокомпьютеринг.

ДТИ. В рамках ЕКП используются практически все основные выводы ДТИ. Подчеркнем здесь один из главных выводов. Генерация и рецепция информации представляют собой дополнительные (дуальные) процессы, для чего когнитивная система должна включать *две разные* (но связанные) подсистемы.

Нейропсихология. В работах практикующего нейропсихолога Э. Голдберга [Goldberg, 2009] было показано, что существует определенная специализация полушарий головного мозга. Правое полушарие (ПП) ответственно за восприятие новой информации, обучение и творчество, т. е. *генерацию* новой информации. Левое полушарие (ЛП) ответственно за обработку хорошо известной информации, т. е. рецепцию уже существующей информации. Совпадение этой парадигмы с главным выводом ДТИ очевидно. Важно подчеркнуть, что вывод именно о такой специализации двух подсистем является одновременно и теоретическим (ДТИ), и экспериментальным. Подобное совпадение явилось для нас приятным сюрпризом и косвенным подтверждением адекватности ЕКП.

Нейрофизиология. Нейрон является очень сложной биологической системой, тем не менее известны довольно простые модели нейрона, которые до сих пор считаются достаточно адекватными (см., например, [Izhikevich, 2007]). Это модель Хочкина–Хаксли [Hodgkin, Huxley, 1963] и ее упрощенная версия, модель ФицХью–Нагумо [FitzHugh, 1961; Nagumo, Arimoto, Yashizawa, 1962]. В рамках ЕКП используется модель динамического формального нейрона [Chernavskaya, 2013], которая представляет собой предельный случай модели ФицХью–Нагумо.

Нейрокомпьютеринг. Используются нейропроцессоры типа Хопфилда и Гроссберга, однако в континуальном представлении динамического формального нейрона, т. е. модели (1) и (4).

Подчеркнем, однако, что в ЕКП используется модифицированная версия модели (4), а именно:

$$\frac{dG_k(t)}{dt} = \frac{1}{\tau^G} \left[\mathfrak{F}_G \{G_k, \alpha_k\} - \theta(\Psi_0 - \Psi) \cdot \sum_{l \neq k} \Gamma_{kl} \cdot G_k \cdot G_l + \theta(\Psi - \Psi_0) \cdot \sum_{l \neq k} \Omega_{kl} \cdot G_l \right] + Z(t) \cdot \xi(t), \quad (7)$$

где внутренняя динамика описывается тем же функционалом $\mathfrak{F}_G(G_k, \alpha_k)$, что и в (4). Отличие заключается в том, что введены две ступенчатые функции, благодаря которым до окончания процедуры выбора символа и формирования межпластинных связей Ψ работает конкурентное взаимодействие. Затем символы-победители получают возможность вступать в кооперативное взаимодействие друг с другом, как и на пластине Хопфилда, и формировать тем самым так называемый *обобщенный* образ, или «образ из символов». Причем этот процесс повторяется на всех уровнях иерархии.

Подчеркнем, что те нейроны на пластинах G , которые «проиграли» борьбу за право стать символом данного образа, могут только конкурировать за право стать символом другого образа. Участия в формировании следующих уровней они не принимают (пока не станут символами).

3.2. Самоорганизация: принцип «почернения связей»

В соответствии с общими принципами ДТИ и выводами нейропсихологии когнитивная система в ЕКП должна состоять из двух связанных подсистем. По аналогии с полушариями мозга систему, ответственную за генерацию информации (обучение), будем называть «правая подсистема» (ПП). Систему, ответственную за рецепцию уже существующей информации, будем называть «левая подсистема» (ЛП). Диалог этих подсистем обеспечивают межподсистемные связи $\Lambda(t)$, представляющие собой аналог *corpus callosum*.

В рамках ЕКП система формируется самоорганизованно, по принципу «почернения связей». Это означает, что все связи в ПП обучаются по принципу Хебба, т. е. аналогично (3), а в ЛП — по принципу Хопфилда, т. е. аналогично (2). Когда связи, формирующие образ в ПП, становятся достаточно сильными («черными»), этот образ передается на следующий уровень иерархии (для формирования его символа) и одновременно копируется в ЛП (рис. 2, а), где изначально «черные» связи остаются неизменными, а лишние связи вымирают. На втором этапе (рис. 2, б), после формирования символа и «почернения» его семантических связей с образом Ψ в ПП, символ передается в ЛП. Таким образом, подсистема ПП обучается сама, а затем выступает в роли «учителя» для ЛП.

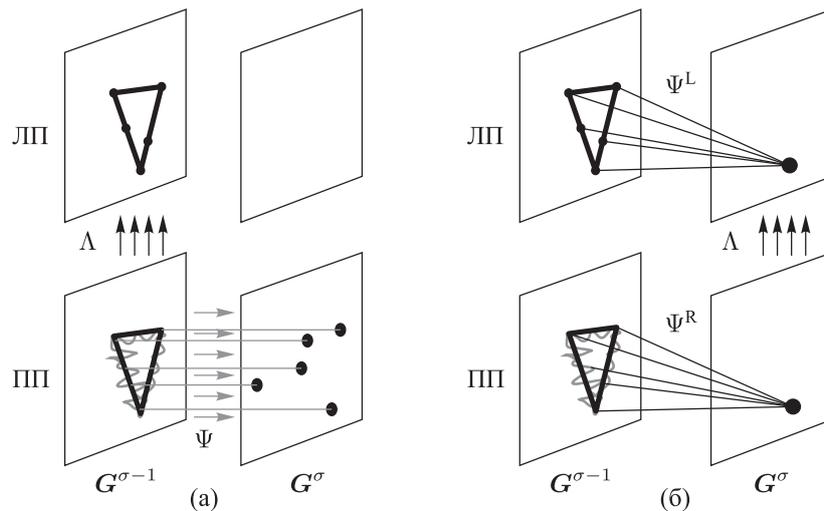


Рис. 2. Иллюстрация к элементарному акту формирования нового символа; а), б) — стадии процесса формирования (см. пояснения в тексте). Обозначения: ЛП — левая подсистема, ПП — правая подсистема, Λ — межподсистемные связи, Ψ — прямые межпластинные связи, Ψ^R и Ψ^L — межпластинные связи «образ \leftrightarrow символ» в ПП и ЛП соответственно, σ — номер уровня иерархии

Подчеркнем, что этот процесс повторяется на всех уровнях иерархии, тем самым создавая фрактальную структуру всей когнитивной архитектуры ЕККА.

4. Основные особенности ЕККА

Напомним основные особенности архитектуры ЕККА, подробно описанной в работах [Chernavskaya et al., 2013, 2015; Чернавская, Чернавский, 2016; Chernavskaya, Rozhylo, 2016, 2017]. Схема приведена на рис. 3.

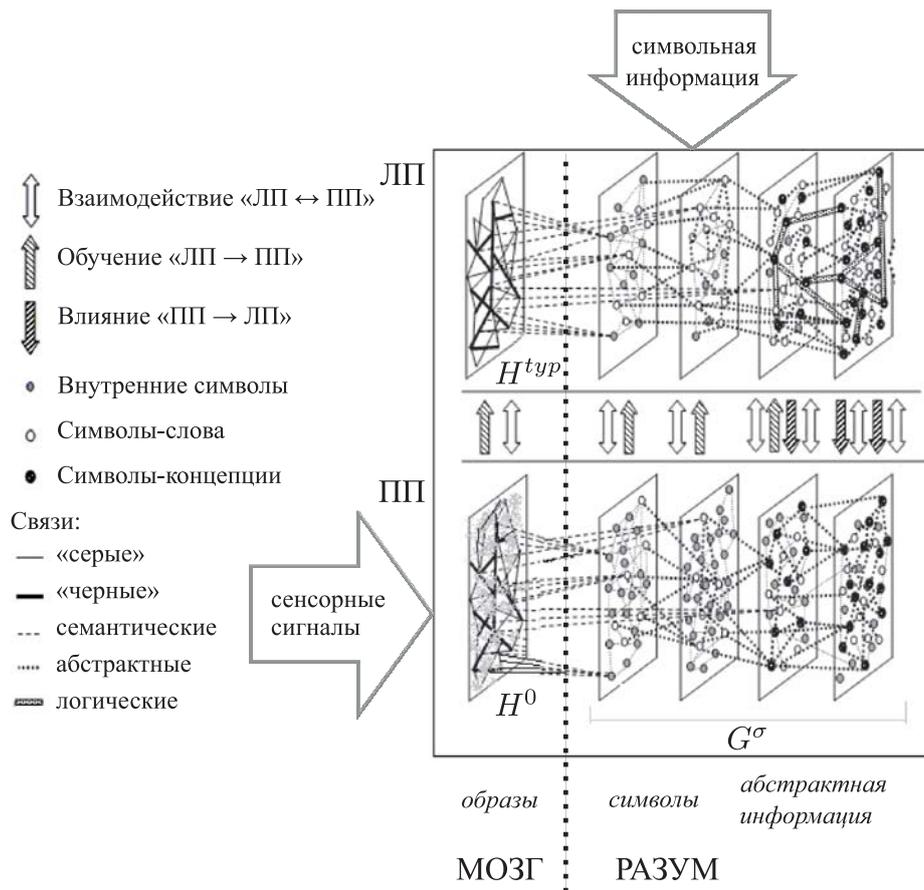


Рис. 3. Естественно-конструктивистская когнитивная архитектура (ЕККА) (см. пояснения в тексте)

4.1. Структура ЕККА

Вся когнитивная система представляет собой сложную блочно-иерархическую комбинацию нейропроцессоров типа Хопфилда (1) и квази-Гроссберга (7). Здесь часть «квази» означает, что такая модель процессора допускает как конкурентное взаимодействие на стадии выбора символа, так и кооперативное взаимодействие с другими символами того же уровня. В соответствии с основными выводами ДТИ система состоит из двух связанных подсистем, ПП и ЛП, причем генерация информации происходит в ПП, а рецепция — в ЛП. Диалог подсистем обеспечивают межподсистемные связи $\Lambda(t)$.

Нулевой уровень иерархии представлен двумя пластинами типа Хопфилда: H^0 (ПП) и H^{top} (ЛП), которые получают сенсорные сигналы от реальных объектов и записывают эту информацию в виде *образов* (только распределенная память). Фактически эта информация является объективной, поскольку порождена внешними сигналами, воспринимаемыми нейронами мозга, т. е. «Мозгом».

Отметим, что H^0 содержит всю информацию, даже записанную относительно слабыми («серыми») связями, которая соответствует относительно редким (атипичным) репрезентациям данного реального объекта. Образы, записанные сильными («черными») связями, называются типичными образами. Они передаются (копируются) в H^{op} для хранения и распознавания и соответствуют типичным репрезентациям объектов. Именно нейроны типичных образов принимают участие в процедуре выбора символа (см. рис. 2).

Следующий уровень иерархии содержит уже *символы* типичных образов. Благодаря процедуре формирования символа, принятой в ЕКП, они представляют собой уже условную информацию, порожденную самим ансамблем нейронов и не связанную напрямую с «материальными» (сенсорными) сигналами. Как было сказано, эти символы представляют собой «молекулы Разума».

На более высоких уровнях символы порождают обобщенные образы («образ из символов»), которые также являются порождением самой системы, т. е. индивидуальной условной информацией.

На верхних уровнях иерархии возникают абстрактные понятия и символы-концепции, такие как *совесть*, *бесконечность*, *наука* и т. д. Они не имеют «материального содержания» и не соответствуют никаким конкретным образам, однако имеют смысл, т. е. их можно «объяснить словами». Эти уровни представляют «чистый Разум».

Таким образом, когнитивная система развивается и растет от низших уровней образного восприятия, через *семантическую* символьную информацию (понятную лишь данной индивидуальной системе), — т. е. наделение образов символами и построение более сложных (символьных) образов, — к верхним уровням, содержащим абстрактные понятия и связи между ними. Последние могут быть сформулированы на общепринятом языке и понятны всему сообществу. Так же происходит развитие отдельной человеческой личности (онтогенез).

В работе [Чернавская, Чернавский, 2016] было показано, что такое расположение функциональных уровней повторяет расположение функциональных зон неокортекса. Подчеркнем, что этот факт не был заложен в модель заранее, а явился следствием наших теоретических построений.

4.2. Интерпретация

Рассмотрим, какие элементы архитектуры ЕККА отвечают понятиям, традиционно относимым к области «Разума» и трудно формулируемым на языке нейронов. Однако необходимо заранее подчеркнуть, что понятия «сознание», «подсознание», «интуиция», так же как понятия «информация» и «мышление», не имеют четкого и ясного определения.

Подсознание определяют как «совокупность процессов, в отношении которых отсутствует субъективный контроль» [Википедия]. Как можно интерпретировать это в терминах нейронного ансамбля?

Пластина H^0 в ПП играет особую роль в модели ЕККА. Она содержит всю образную информацию, когда-либо воспринимаемую системой, включая слабые («серые») связи, поэтому мы назвали ее «размытое множество» (*fuzzy set*). Роль «серых» связей состоит в том, чтобы хранить «случайную» информацию, которая когда-то может оказаться важной. Эта информация не переходит ни в ЛП, ни на следующий уровень G^1 в ПП, поэтому не может ассоциироваться ни с каким *символом*, т. е. остается *не осознанной* и *не подконтрольной* системе, что соответствует определению подсознания. Такая («серая») цепочка может активироваться только благодаря шуму, что можно интерпретировать как *озарение*.

Сознание определяют так: «Единство психических процессов, активно участвующих в осмыслении человеком объективного мира и своего собственного бытия. Оно возникает в процессе трудовой, общественно-производственной деятельности людей и неразрывно связано с языком, который так же древен, как и сознание» [Цифровая библиотека по философии]. Первая часть этого определения, представляет собой тавтологию (сознание есть осмысление), но вторая содержит важную мысль: сознание начинается после овладения языком. Речь пред-

ставляет собой последовательный временной ряд символов, что необходимо, чтобы выразить *мысль* как основной элемент сознания. Эту же идею высказал Теренс Дикон [Deacon, 1997]. Следовательно, сознание возникает в модели ЕККА после развития символьных уровней, достаточного для *вербализации*, т. е. установления соответствия между *внутренними символами* (сформированными в ПП и запомненными в ЛП) и общепринятыми *словами*. Эта процедура была рассмотрена в работе [Чернавская и др., 2014]. Следует подчеркнуть, что после вербализации ЛП имеет возможность получать символьную информацию непосредственно извне (минуя ПП), т. е. получать так называемое семантическое знание. Знание, полученное собственным чувственным опытом, называется эпизодическим, оно *возникает* в ПП и хранится в ЛП.

Интуиция определяется как «метод решения задач посредством единомоментного под-сознательного вывода, основанный на предшествующем опыте» [Википедия], или «прямое усмотрение истины» [Kant, 1949]. В модели ЕККА, согласно принципу «почернения связей», при переходе от каждого предыдущего уровня к последующему часть информации (записанная в ПП недостаточно «черными» связями) теряется, точнее, переходит в разряд «скрытой» (служебной) для данной системы. Эта информация не может быть четко запомнена (не передается в ЛП) и *сформулирована* (не получает своего символа на следующем уровне ПП). Однако она существует в системе и может быть активирована благодаря случайному воздействию. Именно эта скрытая (латентная) информация представляет основу интуиции в ЕККА.

Логика определяется как «способность к рассуждению, наука о формах и законах *правильного мышления*» [Википедия]. Само определение подразумевает (а) владение языком и (б) владение *общепринятыми* (т. е. *правильными* с точки зрения данного социума) концепциями. В модели ЕККА такие процессы могут происходить только в ЛП, причем на высоких уровнях иерархии.

4.3. Математика и философия

Математическое основание архитектуры ЕККА подробно обсуждалось в работах [Chernavskaya et al., 2013, 2015; Чернавская, Чернавский, 2016]. Приведем здесь уравнения в краткой (обобщенной) форме для пояснения некоторых философских выводов.

$$\frac{dH_i^0(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_i^H} \left[\mathfrak{S}_H \{H, \beta_i(G^R_{\{i\}})\} + \sum_{i \neq j}^n \Omega_{ij}^{Hebb} H_j^0 + \sum_k \Psi_{ik} G_k^{R,1} - \Lambda(t) \cdot H_i^{typ} \right] + Z(t) \xi_i(t), \quad (8)$$

$$\frac{dH_i^{typ}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_i^H} \left[\mathfrak{S}_H \{H, \beta_i(G^L_{\{i\}})\} + \sum_{i \neq j}^n \Omega_{ij}^{Hopf} \cdot H_j^{typ} + \sum_k \Psi_{ik} \cdot G_k^{L,1} + \Lambda(t) \cdot H_i^0 \right], \quad (9)$$

$$\frac{dG_k^{R,\sigma}}{dt} = \frac{1}{\tau_G} \left[\mathfrak{S}_G \{G_k, \alpha_k^\sigma (\{\Psi_{ik}^{R,(\sigma-1)}\}, G^{\sigma+\nu})\} + \hat{Y} \{G_k^{R,\sigma}, G_l^{R,(\sigma+\nu)}\} - \Lambda(t) \cdot G_k^{L,\sigma} \right] + Z(t) \cdot \xi_k(t), \quad (10)$$

$$\frac{dG_k^{L,\sigma}}{dt} = \frac{1}{\tau_G} \left[\mathfrak{S}_G \{G_k, \alpha_k^\sigma (\{\Psi_{ik}^{L,(\sigma-1)}\}, G^{L,(\sigma+\nu)})\} + \hat{Y} \{G_k^{L,\sigma}, G_l^{L,(\sigma+\nu)}\} + \Lambda(t) \cdot G_k^{R,\sigma} \right], \quad (11)$$

$$\frac{dZ(t)}{dt} = \frac{1}{\tau^Z} \cdot [a_{z\mu} \cdot \mu + a_{zz} \cdot (Z - Z_0) + F_Z(\mu, Z) - X\{\mu, G_k^{R,\sigma}\} + W\{H_i^0, H_i^{typ}\}], \quad (12)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{1}{\tau^\mu} \cdot [a_{\mu\mu} \cdot \mu + a_{\mu Z} \cdot (Z - Z_0) + F_\mu(\mu, Z)], \quad (13)$$

$$\Lambda(t) = -\Lambda_0 \cdot th \left(\gamma \cdot \frac{dZ}{dt} \right). \quad (14)$$

Здесь переменные H_i и G_k^σ относятся к динамическим формальным нейронам, обеспечивающим чисто мыслительный (без учета эмоций) процесс (что ассоциируется с неокортексом). Функционалы \mathfrak{Z}_H и \mathfrak{Z}_G описывают внутреннюю динамику соответствующих переменных, функционалы $Y\{G_k^R\}$ и $Y\{G_k^L\}$ описывают взаимодействие символов на всех уровнях иерархии; индексы R и L относятся к переменным, принадлежащим ПП и ЛП соответственно. Подчеркнем, что континуальное представление дает возможность учесть параметрическую модификацию тех нейронов, которые участвуют в процессах формирования символов: параметры β в (8), (9) и α в (10), (11) зависят от сформированных символов и связей. Это дает уникальную возможность интерпретировать недавние экспериментальные данные [Svarnik, Anokhin, Aleksandrov, 2015] о специфической модификации тех нейронов, которые принимают участие в приобретении некоего нового опыта.

Первых два уравнения представляют низший (нулевой) уровень иерархии, следующие уравнения (переменные G^σ) описывают $\sigma = 1, \dots, N$ символьных уровней. Точечная линия между первыми двумя и остальными переменными соответствует вертикальной точечной линии на рис. 3. Она символизирует условную границу между «Мозгом» и «Разумом». Действительно, пластины H нулевого уровня содержат первичные образы, возникающую как отклик на сенсорную информацию, получаемую извне. Эта информация может считаться объективной, следовательно, этот уровень относится к «Мозгу». Но следующий уровень ($\sigma = 1$), содержащий символы типичных образов, уже начинает представлять зарождение «Разума», поскольку, согласно ДТИ, символ является не объективной, а субъективной (условной) и индивидуальной информацией, созданной самой системой в процессе ее развития. Это утверждение тем более верно для высших уровней иерархии, соответствующих абстрактной информации, возникшей в данной системе. Таким образом, мы можем заключить, что в архитектуре ЕККА «Разум» развивается на основе «Мозга» путем самоорганизованного формирования символов все более высокой степени абстракции.

Случайное самовозбуждение (шум) представлено членом $Z(t)\xi(t)$, где $Z(t)$ — амплитуда шума, $0 < \xi(t) < 1$ — случайная функция (получаемая обычно методом Монте-Карло). Согласно общим принципам ДТИ шум присутствует только в уравнениях для ПП. В наших ранних работах [Chernavskaya et al., 2013; Чернавская и др., 2014] амплитуда шума рассматривалась как модельный параметр.

Переменная $\Lambda(t)$ представляет межподсистемные связи, обеспечивающие диалог двух подсистем. Здесь принято: $\Lambda = +\Lambda_0$ отвечает переходу ПП \rightarrow ЛП, а $\Lambda = -\Lambda_0$ отвечает обратному переходу ЛП \rightarrow ПП. Эта переменная присутствует во всех уравнениях (8)–(11), «сшивая» все компоненты вместе. Эти связи не могут обучаться, а зависят от конкретной стадии когнитивного процесса. Однако в наших ранних работах [Chernavskaya et al., 2013; Чернавская и др., 2014] механизм переключения определен не был.

Нижний блок уравнений (12)–(14) относится к представлению эмоций в рамках ЕКП. Так же как и мыслительные процессы, эмоции имеют двойственную природу: осознание эмоций требует участия «Разума», а композиция нейротрансмиттеров, которая контролирует эмоциональное состояние, определяется (см., например, [Stirling, Elliott, 2010]) процессами в подкорковых структурах (таламус, амигдала, базальные ганглии), которые относятся к области «Мозга» (причем эволюционно более древней его части по отношению к неокортексу). Мы учитываем двойственную природу эмоций путем введения двух взаимодействующих переменных. Агрегатная переменная $\mu(t)$ представляет «эффективную композицию» нейротрансмиттеров (стимулянт минус ингибиторы), которая относится к продукции подкорковых структур («Мозг»). Более сложным является вопрос о том, какая переменная может обеспечивать субъективные эмоциональные ощущения. В работах [Chernavskaya et al., 2015; Chernavskaya, Rozhylo, 2016] были выдвинуты аргументы в пользу того, что в роли «эмоциональной температуры» должна выступать именно амплитуда случайной компоненты $Z(t)$. Тогда эмоции соответствуют производной dZ/dt (которая может быть либо положительной, либо отрицательной), взятой со знаком минус. Это означает, что повышение амплитуды шума соответствует отрицательным эмоциям

(испуг, страх, неожиданность), что требует активации ПП. Напротив, снижение шума соответствует найденному решению какой-либо задачи, формированию нового символа) и успешному распознаванию (функционалы $X\{\mu, G_k^{R\sigma}\}$ и $W\{H_i^0, H_i^{yp}\}$ в (12)), т. е. соответствует положительным эмоциям (удовлетворение, релаксация, гордость); при этом активность передается в ЛП. Следовательно, именно эта производная должна регулировать диалог подсистем, т. е. переменную $\Lambda(t)$ согласно (14). Поэтому на рис. 3 маркер «эмоции» помещен между подсистемами.

Таким образом, после учета эмоциональной компоненты когнитивного процесса система уравнений (8)–(14) оказывается *полной* в математическом смысле, т. е. все переменные определены через их взаимодействие. Иными словами, мы приходим к вполне естественному философскому заключению: самосогласованное описание когнитивного процесса должно включать и рациональную, и эмоциональную компоненты.

5. Заключение

Мы показали, что ДТИ, как наука о возникновении и развитии информации, является действительно мощным и адекватным инструментом для моделирования человеческого мышления.

Важно подчеркнуть, что одной из заслуг ДТИ является пристальное внимание к серьезной философской проблеме: соотношение случайности и детерминированности в жизненных процессах (включая историю, экономику, социологию и мышление). В рамках ДТИ случайность (шум) рассматривается не как неизбежная и досадная помеха (как это принято в технических дисциплинах, коммуникациях и ИИ), а обязательный и полноправный член всех процессов, связанных с возникновением новой информации.

Отметим, что разделение понятий объективной (безусловной) и субъективной (условной) информации позволяет провести грань между материальной и виртуальной сущностью самого понятия «информация». Отсюда следует естественный вывод о том, что все, что относится к области «Разума», представляет собой условную информацию.

Разработанная в рамках ДТИ и ЕКП процедура конверсии «образ → символ» является не детерминированным алгоритмом, задаваемым извне (как это делается в работах по созданию ИИ), а самоорганизованным процессом, в результате которого возникает субъективная (индивидуальная) информация, порожденная самой системой, т. е. ансамблем нейронов мозга. В рамках ДТИ такой механизм получил название «борьба условных информаций» и использовался в [Чернавский, 2004] для описания многих процессов в сложных развивающихся системах (биологии, экономике) и т. д.

Тезис ДТИ о необходимости двух подсистем для генерации и рецепции информации подтверждается практическими выводами [Goldberg, 2009] о том, что одно полушарие мозга отвечает за обучение новому и творчество, а другое — за обработку уже известной информации. В рамках ЕКП мы можем указать, за счет какого *механизма* может возникать такая специализация. Ее обеспечивают три фактора:

- наличие шума только в одной подсистеме (ПП);
- разные законы обучения связей: хеббовский принцип *выбора* связей в ПП и хопфилдовский принцип *отбора* нужных связей в ЛП;
- самоорганизация на основе принципа «почернения связей».

Эти факторы приводят к тому, что ПП обеспечивает обучение и выступает в роли «Учителя» для ЛП. Далее, «наученная» ЛП может обеспечивать обработку (распознавание, прогноз и т. п.) известной информации.

Следует отметить, что ЛП фактически представляет собой аналог ИИ, но для того, чтобы понять, как именно она возникает, необходима подсистема ПП.

Мы показали, что самосогласованная модель когнитивного процесса должна учитывать эмоциональную составляющую. В рамках ЕКП эмоции рассматриваются как совместный продукт «Мозга» (причем подкорковых структур, более древних по отношению к неокортексу)

и «Разума». Причем именно динамика амплитуды шума считается «эмоциональной температурой», и именно она контролирует диалог двух подсистем.

Мы показали, что модель ЕККА, разработанная в рамках ЕКП и ДТИ, позволяет сформулировать и интерпретировать такие понятия, как сознание, подсознание, интуиция, относящиеся к области «Разума», в терминах структуры ансамбля нейронов.

Таким образом, ДТИ дает возможность построить модель, позволяющую проследить, как на основе «Мозга» появляется «Разум».

Список литературы (References)

Википедия [Электронный Ресурс]: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

Жданов А. А. Автономный искусственный интеллект. — М.: БИНОМ, 2015.

Zhdanov A. A. Avtonomnyi Iskusstvennyi Intellect [Autonomous Artificial Intelligence]. — Moscow: BINOM, 2015 (in Russian).

Колупаев А. Г., Чернавский Д. С. Перемешивающий слой // Краткие сообщения по физике. — 1997. — Т. 1, № 2. — С. 12–18.

Kolupaev A. G., Chernavskii D. S. Peremeshivayushchiy sloy [Mixing layer] // Short reports on physics. — 1997. — Vol. 1, no. 2. — P. 12–18 (in Russian).

Цифровая библиотека по философии [Электронный ресурс]: <http://filosof.historic.ru/enc/item/f00/s10/a001041.shtml>

Cifrovaja biblioteka po filosofii [Digital library on philosophy]: <http://filosof.historic.ru/enc/item/f00/s10/a001041.shtml>

Чернавская О. Д., Чернавский Д. С. Естественно-конструктивистский подход к моделированию мышления // Биофизика. — 2016. — Т. 61, № 1. — С. 185–200.

Chernavskaya O. D., Chernavskii D. S. Natural-Constructive Approach to modeling the Cognitive Process // Biophysics. — 2016. — Vol. 61, no. 1. — P. 155–169. (Original Russian paper: Chernavskaya O. D., Chernavskii D. S. Estesstvenno-konstruktivistiskii podhod k modelirovaniyu myshleniya // Biofizika. — 2016. — Vol. 61, no. 1. — P. 185–200.)

Чернавская О. Д., Чернавский Д. С., Карп В. П., Никитин А. П., Щепетов Д. С. О подходе к процессу моделирования мышления с позиций динамической теории информации // Подходы к моделированию мышления: Сборник. Под ред. В. Г. Редько. — М.: ЛЕНАНД, 2014.

Chernavskaya O. D., Chernavskii D. S., Karp V. P., Nikitin A. P., Schepetov D. S. O podhode k modelirovaniyu processa myshleniya s pozicii dinamicheskoy teorii informacii [On the approach to modeling the cognitive process from the viewpoint of dynamical theory of information] // Approaches to modeling the cognitive process. Ed. V. G. Red'ko. — Moscow: LENAND, 2014.

Чернавский Д. С. Синергетика и информация. Динамическая Теория Информации. — М.: Едиториал УРСС, 2004.

Chernavskii D. S. Sinergetika i informaciya. Dinaicheskaya Teoriya Informacii [Synergetics and Information: Dynamical Theory of Information]. — Moscow: Editorial URSS, 2004 (in Russian).

Шамис А. Л. Пути моделирования мышления. — М.: КомКнига, 2006.

Shamis A. L. Puti modelirovaniya myshleniya [The ways of thinking modeling]. — Moscow: Komkniga, 2006 (in Russian).

Chernavskaya O. D., Chernavskii D. S., Karp V. P., Nikitin A. P., Shchepetov D. S. An architecture of thinking system within the Dynamical Theory of Information // Biologically Inspired Cognitive Architecture. — 2013. — Vol. 6. — P. 147–158.

Chernavskaya O. D., Chernavskii D. S., Karp V. P., Nikitin A. P., Shchepetov D. S., Rozylo Ya. A. An architecture of the cognitive system with account for emotional component // Biologically Inspired Cognitive Architecture. — 2015. — Vol. 12. — P. 144–154.

Chernavskaya O. D., Rozhylo Ya. A. The Natural-Constructive Approach to Representation of Emotions and a Sense of Humor in an Artificial Cognitive System // IARIA Journal of Life Sciences. — 2016. — Vol. 8, no. 3&4. — P. 184–202.

- Deacon T. W.* The symbolic species: the co-evolution of language and the brain. — N. Y.: Norton, 1997.
- Doya K.* Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control // *Current Opinion in Neurobiology*. — 2000. — Vol. 10. — P. 732–739.
- FitzHugh R.* Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // *Biophys J*. — 1961. — Vol. 1. — P. 445.
- Goldberg E.* The new executive brain. — Oxford University Press, 2009.
- Grossberg S.* Studies of Mind and Brain. — Boston: Riedel, 1982.
- Haken H.* Information and Self-Organization: A macro-scopic approach to complex systems. — Springer, 2000.
- Hebb D. O.* The organization of behavior. — John Wiley & Sons, 1949.
- Hodgkin A. L., Huxley A. F.* A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // *The Journal of physiology*. — 1963. — Vol. 117. — P. 500–544.
- Hopfield J. J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // *Proceedings of the national academy of sciences (PNAS)*. — 1982. — Vol. 79. — P. 2554.
- Izhikevich E. M.* Dynamical systems in neuroscience: the geometry of excitability and bursting. — MIT Press, 2007.
- Izhikevich E. M., Edelman G. M.* Large-scale model of mammalian thalamocortical systems // *Proceedings of the national academy of sciences (PNAS)*. — 2008. — Vol. 105. — P. 9.
- Kant I.* Critick of Rure Reason. — William Pickering, London. 1838; original 3-d edition: "Kritic der reinen Vernunft". — J. F. Hartknock, 1790 (in Deutch).
- Kohonen T.* Self-Organizing Maps. — Springer, 2001.
- Koziol L. F., Budding D. E.* Subcortical Structures and Cognition: Implications for Neurophysiological Assessment. — Springer, 2009.
- Laird J. E.* The Soar cognitive architecture. — MIT Press, 2012.
- LeCun Y., Bengio Y., Hinton G.* Deep Learning // *Nature*. — 2015. — Vol. 521. — P. 436–444.
- Levin J.* Materialism and Qualia: The Explanatory Gap // *Pacific Philosophical Quarterly*. — 1983. — Vol. 64, no.4. — P. 354–361.
- Nagumo J., Arimoto S., Yashizawa S.* An active pulse transmission line simulating nerve axon // *Proceedings of IRE*. — 1962. — Vol. 50. — P. 2062.
- Panksepp J., Biven L.* The Archaeology of Mind: Neuroevolutionary Origins of Human Emotions. — N. Y.: Norton, 2012.
- Penrose R.* Shadows of the Mind. — Oxford University Press, 1994.
- Prigogine I.* End of Certainty. — The Free Press, 1997.
- Quastler H.* The emergence of biological organization. — New Haven: Yale University Press, 1964.
- Samsonovich A.* Bringing consciousness to cognitive neuroscience: a computational perspective // *Journal of Integrated Design and Process Science*. — 2007. — Vol. 1. — P. 19–30.
- Svarnik O. E., Anokhin K. V., Aleksandrov Yu. I.* Experience of a First Whisker-Dependent Skill Affects: the Induction of c-Fos Expression in Somatosensory Cortex Barrel Field Neurons in Rats on Training the Second Skill // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. — 2015. — Vol. 45. — P. 724.
- Turing A. M.* Computing machinery and intelligence // *Mind*. — 1950. — Vol. 59. — P. 433–460.
- Vershure P.* The Distributed Adaptive Control: A theory of the mind, brain, body nexus // *Biologically Inspired Cognitive Architecture*. — 2012. — Vol. 1. — P. 55–72.
- Weaver W., Shannon C.* The Mathematical Theory of Communication. — Univ. of Illinois Press, 1963.
- Wiener N.* Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine. — MIT Press, 1948.