

# Формализация когнитивного когов<sup>1\*</sup>

Витяев Е.Е.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Новосибирск, [vityaev@math.nsc.ru](mailto:vityaev@math.nsc.ru)

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

**Аннотация.** Формализация когнитивного когова осуществлена путем формализации когов функциональных систем и когов феноменального. Эта формализация основана на выделении высоко коррелированной структуры причинных связей воспринимаемых объектов, что позволяет построить единую формализацию «естественной» классификации, «естественных» понятий и интегрированной информации по G. Tononi.

## 1. Введение

Понятие когнитивного когова – когнитивной гиперсети головного мозга – является в настоящее время одним из наиболее развитых подходов к изучению фундаментальных механизмов работы мозга и когнитивных функций [1]. Когнитивный когов состоит из взаимосвязанных когов («когнитивных групп нейронов, представляющих элементы субъективного опыта») двух типов – обобщающих функциональные системы и элементы феноменального опыта. Вторые возникают из первых: «за счет активности первых и перекрытия на некоторых популяциях клеток – клеточных ансамблях Д. Хебба» [1]. Эти перекрытия возникают тогда, когда в разных функциональных системах фигурируют одни и те же объекты, ситуации, способы действия, возбуждающие эти ансамбли клеток.

Гиперсеть когнитивного когова – это сети, сетей, сетей ..., состоящие из гиперсимплексов. К.В. Анохин видит «задачу фундаментальной теории мозга и разума в описании этих структур, их происхождения, функций и процессов в них» [1]. В такой постановке к гиперсетям предъявляются достаточно сильные требования – они должны объяснить весь комплекс когнитивных процессов: сознание, формирование «образа мира», целенаправленное поведение, формирование понятий и концептов, восприятие, обучение и т.д. Однако, гиперсети – это, прежде всего, математический и информационный объект. Одним только определением гиперсетей, как сети, сетей, сетей ... гиперсимплексов все эти процессы объяснить невозможно. Необходимо включить в рассмотрение формальную модель внешнего мира, а также информационные процессы, происходящие в нейронах и связях между ними.

В качестве формальной модели внешнего мира нами предлагается оригинальная формализация «естественной» классификации объектов внешнего мира [7-8], основанная на вероятностном обобщении формальных понятий [8,32]. Понятие «естественной» классификации формализует представления естествоиспытателей о строении «естественных» объектов внешнего мира [7,11]. Мы покажем, что данная формализация является также формализацией «естественных» понятий, как это определено в работах [22-24]. Определение «естествен-

---

<sup>1</sup> Автор выражает благодарность К.В. Анохину за полезные советы и обсуждения.

\* Данная работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-07-03410-а.

## Формализация когнитивного

ных» понятий основано на принципе категоризации Eleanor Rosch, постулирующей структурность воспринимаемого мира: «воспринимаемый мир не является неструктурированным множеством равновероятно встречающихся свойств, наоборот, объекты воспринимаемого мира имеют высоко коррелированную структуру» [24].

Высоко коррелированная структура внешнего мира может улавливаться также интегрированной информацией, определенной G. Toppo [20,28-29]. Но у G. Toppo нет модели внешнего мира, и интегрированная информация рассматривается как внутреннее свойство системы причинных связей, проявляющаяся в сознании. Он определяет понятие концепта как системы причинных связей с максимально интегрированной информацией. Но поскольку у него нет внешнего мира, то он не может сказать, что его понятие концепта отражает «естественные» понятия о «естественных» объектах.

Наша формализация является одновременной формализацией «естественной» классификации, «естественных» понятий и интегрированной информации, поскольку в ее основе лежит одно и то же свойство внешнего мира – высоко коррелированная структура свойств «естественных» объектов [31]. Это свойство максимально точно отражено в нашей оригинальной формализации в виде неподвижных точек взаимных предсказаний свойств «естественных» объектов. Эта формализация дает также формализацию восприятия [9-10] и когов феноменального опыта. Наша формализация принципиально отличается от других формализаций систем причинных связей, основанных на байесовских сетях [19], поскольку байесовские сети не поддерживают циклов.

В когнитивной гиперсети гиперсимплексов является отражением иерархии «естественных» классов внешнего мира, где вершина гиперсимплекса – имя класса, а основание гиперсимплекса – максимально интегрированная информация по G. Toppo или неподвижная точка в нашей формализации.

Приводимая нами единая формализация приводит к следующему принципу работы мозга: *мозг в процессе эволюции настроился на выделение высоко коррелированной структуры причинных связей гиперсетью когнитивного для обнаружения «естественной» классификации и «естественных» понятий объектов внешнего мира.*

Формализация когов второго типа – когов функциональных систем, нами была ранее осуществлена в большом количестве работ [2,18,30]. Формализация этих когов была апробирована путем разработки виртуальных аниматоров, на которых показала свою эффективность [2,16,18,30]. Поэтому, в данной публикации она приведена не будет, но будет указано как два вида когов – функциональных систем и элементов феноменального опыта – взаимодействуют между собой.

## 2. «Естественная» классификация

Высоко коррелированную структуру внешнего мира выявляют две теории – «естественная» классификация и «естественные» понятия. При этом «естественная» классификация говорит о структуре объектов внешнего мира, а «естественные» понятия, исследуемые в когнитивных науках, о восприятии этих «естественных» объектов.

Первый достаточно подробный философский анализ «естественной» классификации принадлежит Дж. Ст. Миллю [21]. Приведем его точку зрения, чтобы стал понятен смысл «естественной» классификации. Сначала отделим «искусственные» классификации от «естественных». Приведем определение Дж. Ст. Милля: *«Возьмем любой признак, и если одни вещи обладают им, а другие не обладают, то на нем можно основать деление всех вещей на два класса». «Но если мы обратимся к ... классу «животное» или «растение», ... и посмотрим, какими особенностями индивидуумы, обнимаемые данным классом, отличаются от индивидуумов, не входящих в него, то мы найдем, что в этом отношении одни классы сильно отличаются от других. ... обладают столь большим количеством признаков, что их нельзя ... перечислить»* [21]. При этом, среди свойств некоторого «естественного» класса будут как наблюдаемые, так и не наблюдаемые свойства. Чтобы учитывать скрытые признаки, надо находить их причинные проявления в наблюдаемых признаках. «Так, например, естественная классификация животных должна основываться преимущественно на их внутреннем строении; однако было бы странно, как замечает О. Конт, если бы мы были в состоянии определить род и вид ... животного, только предварительно убив его» [21].

«Естественную» классификацию Дж. Ст. Милль определяет следующим образом: *«Всего более соответствует целям научной (естественной) классификации, когда предметы соединяются в такие группы, относительно которых можно высказать наибольшее число общих предложений»* [21]. На основании понятия «естественной» классификации Дж. Ст. Миллем определяется понятие «образа» класса, которое является предтечей «естественных» понятий, исследуемых в когнитивной психологии: *«Естественные группы ... определяются признаками, ... при этом принимаются во внимание не только признаки, безусловно общие всем включаемым в группу предметам, но вся совокупность тех признаков, из которых все встречаются в большинстве этих предметов, а большинство – во всех. Вследствие этого наше понятие о классе – тот образ, которым этот класс представлен в нашем уме, – есть понятие о некотором образце, обладающем всеми признаками данного класса»*.

Рассуждения Дж. Ст. Милля были подтверждены естествоиспытателями. Например, В. Уэвель : *«Чем больше общих утверждений об объектах дает возможность сделать классификация, тем она естественней»* [12]. О неисчерпаемом количестве общих свойств у «естественных» классов пишет Л. Рутковский [13]: *«Чем в большем числе существенных признаков сходны сравниваемые предметы, тем вероятнее их одинаковость и в других отношениях»*. Аналогичное высказывание делает Е.С. Смирнов [14]: *«Таксономическая проблема заключается в “индикации”: от бесконечно большого числа признаков нам нужно перейти к ограниченному их количеству, которое заменило бы все остальные признаки»*.

Таким образом, естествоиспытателями было замечено, что описание реальности бесконечно избыточно и что «естественные» классы, которые описываются потенциально бесконечным множеством признаков, могут быть описаны конечным множеством «индикаторных» признаков.

Проблема определения «естественных» классификаций до сих пор обсуждается в литературе [11-12,15,26]. Однако, с нашей точки зрения нет достаточно адекватной формализации «естественной» классификации.

### 3. «Естественные» понятия

В работах Е. Rosch был сформулирован следующий принцип категоризации «естественных» категорий, подтверждающий высказывания Дж. Ст. Милля и естествоиспытателей:

*«Perceived World Structure. The second principle of categorization asserts that ... perceived world – is not an unstructured total set of equiprobable co-occurring attributes. Rather, the material objects of the world are perceived to possess ... high correlational structure ... combinations of what we perceive as the attributes of real objects do not occur uniformly. Some pairs, triples, etc., are quite probable, appearing in combination ... with one, sometimes another attribute; others are rare; others logically cannot or empirically do not occur» [24].*

Непосредственно воспринимаемые объекты (basic objects) – информационно богатые связки наблюдаемых свойств, создающие категоризацию (образ в определении Дж. Ст. Милля): «Categories can be viewed in terms of their clear cases if the perceiver places emphasis on the correlational structure of perceived attributes ... By prototypes of categories we have generally meant the clearest cases of category membership» [25]. «The more prototypical of a category a member is rated, the more attributes it has in common with other members of the category and the fewer attributes in common with members of the contrasting categories» [23-24]. В дальнейшем теория «естественных» понятий Е. Rosch получила название прототипической теории понятий (prototype theory).

В дальнейших исследованиях было обнаружено, что моделей, основанных на признаках, сходстве и прототипах, недостаточно для описания «естественных» классов. Необходимо учитывать теоретические, причинные и онтологические знания, относящиеся к объектам классов. Например, люди не только знают, что птицы имеют крылья, могут летать и вить гнезда на деревьях, но также и то, что птицы выют гнезда на деревьях, потому что могут летать, и летать, потому что они имеют крылья.

Учитывая эти исследования, В. Rehder выдвинул теорию причинных моделей (causal-model theory), в соответствии с которой: «people's intuitive theories about categories of objects consist of a model of the category in which both a category's features and the causal mechanisms among those features are explicitly represented. In other words, theories might make certain combinations of features either sensible and coherent ... in light of the relations linking them, and the degree of coherence of a set of features might be an important factor determining membership in a category» [22]. В теории причинных моделей отношение объекта к категории основывается уже не на множестве признаков и близости по признакам, а на основании сходства порождающего причинного механизма: «Specifically, a to-be-classified object is considered a category member to the extent that its features were likely to have been generated by the category's causal laws, such that combinations of features that are likely to be produced by a category's causal mechanisms are viewed as good category members and those unlikely to be produced by those mechanisms are viewed as poor category members. As a result, causal-model theory will assign a low degree of category membership to objects that have many broken feature correlations (i.e., cases where causes are present but effects absent or vice versa). Objects that have many preserved correlations (i.e., causes and effects both present or

both absent) will receive a higher degree of category membership because it is just such objects that are likely to be generated by causal laws» [22].

Для представления причинного знания В. Rehder использовал причинные графические модели (causal graphical models) путем создания байесовской сети, развертывающейся во времени. Однако Байесовские сети не поддерживают циклов и не могут моделировать циклические причинные связи. Предлагаемая нами формализация прямо моделирует циклические причинные связи, представленные неподвижными точками предсказаний по причинным связям [8,32].

#### 4. Теория интегрированной информации G. Tononi

На высоко коррелированной структуре внешнего мира основана также теория интегрированной информации G. Tononi [20,28-29]. Интегрированная информация у G. Tononi рассматривается как свойство системы циклических причинных связей: «Indeed, a “snapshot” of the environment conveys little information unless it is interpreted in the context of a system whose complex causal structure, over a long history, has captured some of the causal structure of the world, i.e. long-range correlations in space and time» [28].

G. Tononi определяет концепты и концептуальную структуру через локальные максимумы интегрированной информации: «Cause-effect matching ... measures how well the integrated conceptual structure ... fits or ‘matches’ the cause-effect structure of its environment», «... matching should increase when a system adapts to an environment having a rich, integrated causal structure. Moreover, an increase in matching will tend to be associated with an increase in information integration and thus with an increase in consciousness» [29].

G. Tononi определяет сознание как первичное понятие, которое обладает следующими феноменологическими свойствами: composition, information, integration, exclusion [19]. Приведем формулировки этих свойств вместе с нашей интерпретацией этих свойств (приведенной в скобках) с точки зрения «естественной» классификации объектов внешнего мира.

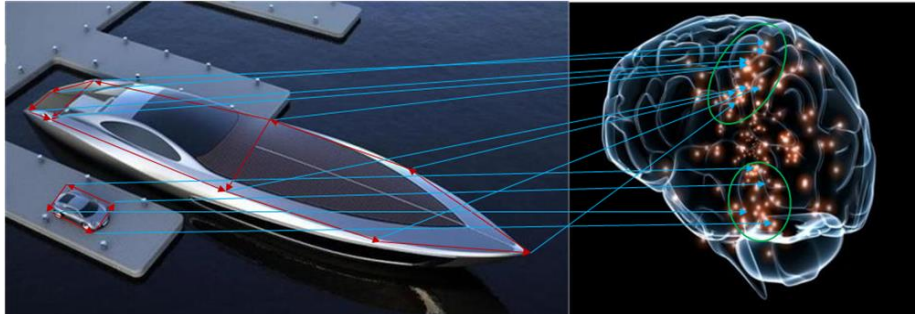
1. composition – elementary mechanisms (causal interactions) can be combined into higher-order ones («естественные» классы объектов образуют иерархию);

2. information – only mechanisms that specify ‘differences that make a difference’ within a system count (только система «резонирующих» причинных связей, формирующая класс, является значимой);

3. integration – only information irreducible to non-interdependent components counts (значима только система «резонирующих» причинных связей, не сводимая к информации отдельных компонент, свидетельствующая об избытке информации и восприятию высоко коррелированной структуры «естественного» объекта);

4. exclusion – only maxima of integrated information count (только значения признаков, которые максимально взаимосвязаны причинными связями формируют «образ» или «прототип»).

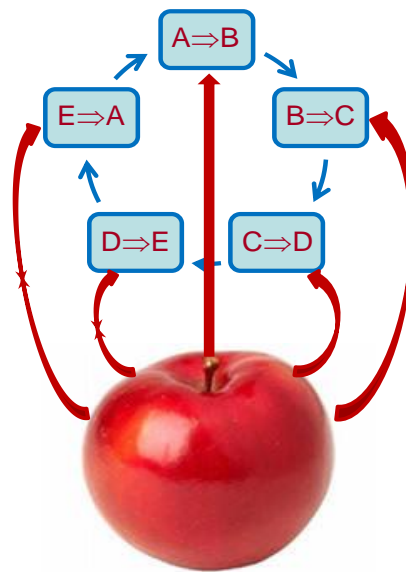
В отличие от G. Tononi, мы рассматриваем эти свойства не как внутренние свойства системы, а как способность системы отражать комплексы причинных связей внешних «естественных» объектов, а сознание – как способность иерархического отражения «естественной» классификации внешнего мира (рис. 1).



**Рис. 2.** Отражение «естественной» классификации внешнего мира (слева) комплексами причинных связей с высокой интегрированной информацией (справа).

Согласно G. Tononi восприятие некоторого «естественного» объекта (рис. 2) осуществляется системой причинных связей (system of complex causal structure), которая настраивается на отражение внешнего мира (captured ... the causal structure of the world) с помощью интегрированной информации. В нашей формализации восприятие «естественного» объекта осуществляется неподвижной точкой предвосхищений ( $A \Rightarrow B$ ), ( $B \Rightarrow C$ ), ( $C \Rightarrow D$ ), ( $D \Rightarrow E$ ), ( $E \Rightarrow A$ ), которая формируется автоматически. Подробнее неподвижные точки определены в следующем параграфе и более детально в работе [9].

В гиперсети когнитива (рис. 3) единицами обработки информации являются конусы гиперсимплексов, в которых происходит сжатие информации, отражающее «естественную» классификацию внешнего мира. Основание конуса – это «неподвижная точка» взаимных предсказаний свойств некоторого «естественного» объекта, а вершина конуса – это сжатая «естественной» классификацией, информация об этом объекте в виде совокупности индикаторных признаков. Вершине класса может быть приписано имя класса. Стрелки вверх означают сжатие информации путем выделения «индикаторных» признаков, а стрелки вниз – это восстановление всей совокупности признаков по индикаторным признакам или имени класса.



**Рис. 1.** Отражение «естественного» объекта «неподвижной» точкой взаимных предсказаний свойств объекта.

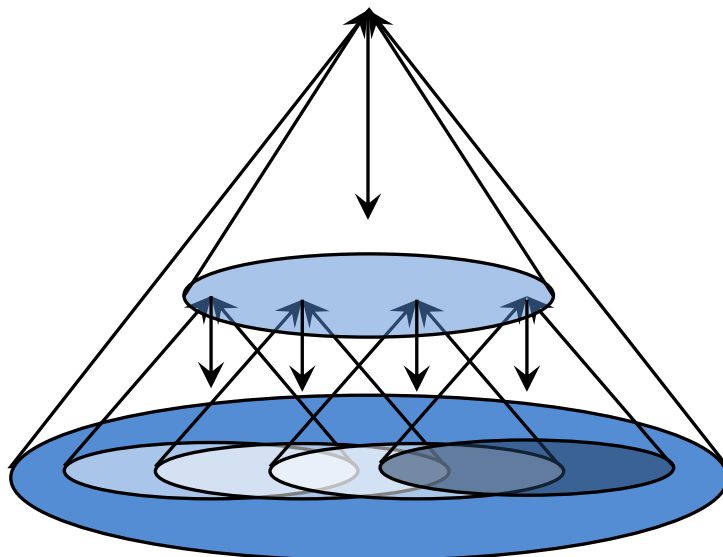


Рис. 3. Гиперсеть когнитома.

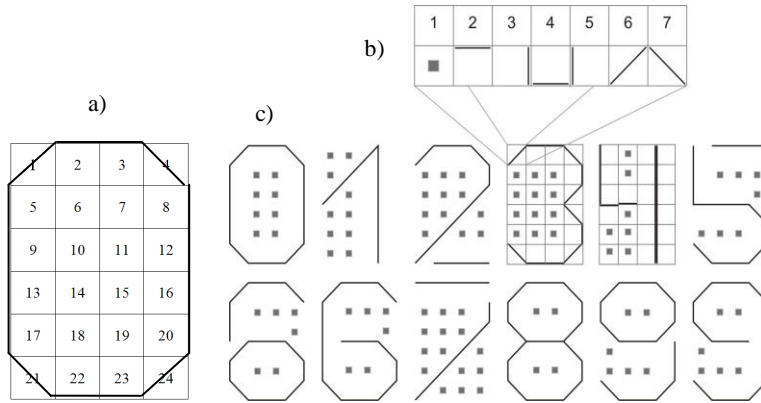
## 5. Вероятностные формальные понятия

В анализе формальных понятий [17] объекты классифицируются следующим образом: в группы выделяются те объекты, которые имеют общий набор признаков, и никакой другой объект ровно этим же набором признаков не обладает. Однако, в высказывании Дж. Ст. Милля: *«при этом принимаются во внимание не только признаки, безусловно общие всем включаемым в группу предметам, но вся совокупность тех признаков, из которых все встречаются в большинстве этих предметов, а большинство – во всех»* имеется ввиду более общий случай, когда общий набор признаков берется не точно, а в большинстве случаев. Чтобы учесть это нами было разработано вероятностное обобщение формальных понятий [6,8,32]. Для этого формальные понятия были представлены неподвижными точками импликаций. Затем, импликации были обобщены на вероятностный случай, как максимально специфические вероятностные правила и, далее, вероятностные формальные понятия были определены как неподвижные точки этих вероятностных импликаций. Было доказано, что в неподвижной точке максимально специфические вероятностные правила, включающие отрицание значений признаков, логически непротиворечивы [8,32].

Неподвижные точки определим следующим образом. Пусть  $X = \{P_1, \dots, P_n\}$  – множество признаков объектов, заданных предикатами,  $MS(X)$  – множество максимально специфических правил  $\{(P_{i_1} \& \dots \& P_{i_k} \Rightarrow P_{i_0})\}$ ,  $\{P_{i_1}, \dots, P_{i_k}\} \subset X$  [3], выполненных на  $X$ . Определим оператор предсказания  $Pr$  [9]:

$$Pr(Y) = \Phi_{\text{Крит}}(Y \cup \{P_{i_0} \mid (P_{i_1} \& \dots \& P_{i_k} \Rightarrow P_{i_0}) \in MS(X)\} \cup \{\neg P_{i_0} \mid (P_{i_1} \& \dots \& P_{i_k} \Rightarrow \neg P_{i_0}) \in MS(X)\}), Y \subseteq X,$$

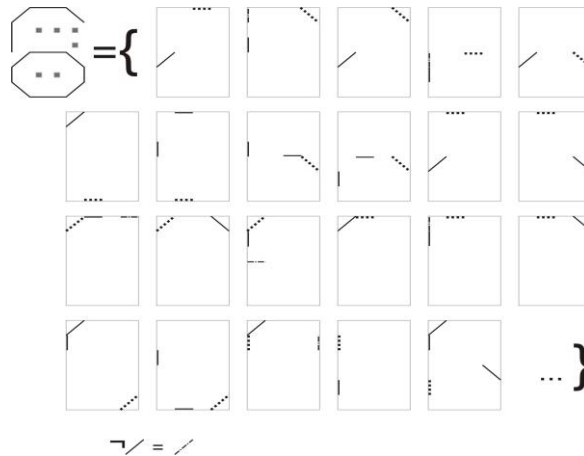
## Формализация когнитива



**Рис. 4.** Кодировка цифр.

где  $\Phi_{\text{Кгит}}(X)$  – оператор, модифицирующий множество признаков путем добавления или удаления некоторого признака так, чтобы заданный критерий Кгит согласованности причинных связей по взаимному предсказанию признаков был максимален. Критерий Кгит также можно рассматривать, как измерение интегрированной информации системы причинных связей  $MS(X)$ , но по смыслу он существенно отличается от теории G. Tononi [20]. Неподвижная точка достигается тогда, когда  $\text{Pr}^{n+1}(X(a)) = \text{Pr}^n(X(a))$  для некоторого  $n$ ,  $X(a) \subseteq X$  – множество признаков объекта  $a$ .

Приведем пример формирования «естественных» классов и «естественных» понятий. Закодируем цифры (рис. 4с) признаками (рис. 4а) со значениями (рис. 4b) как показано на рис. 4. Сформируем обучающее множество, состоящее из 360 перетасованных цифр (12 цифр рис. 4с продублированных в 30-ти экземплярах, без указания, где какая цифра). На этом множестве было обнаружено 55089 закономерностей (общих утверждений об объектах, о которых говорят



**Рис. 5.** Неподвижная точка цифры 6.



Дж. Ст. Милль и В. Уэвель). По этим закономерностям в режиме самообучения было обнаружено ровно 12 неподвижных точек, совпадающих с нашими цифрами, хотя алгоритму ничего не известно о содержании объектов, кроме значений признаков.

Пример неподвижной точки для цифры 6 приведен на рис. 5, где в фигурных скобках приведены описания вероятностных правил, образующих неподвижную точку (посылки правил обозначены сплошной линией, предсказываемый признак – точечной линией, отрицание признака - пунктирной линией). Заметим, что закономерности, используемые в неподвижной точке, выполнены на всех цифрах, а сама неподвижная точка выделяет только одну цифру. Поэтому цифры выделяются не закономерностями, а их взаимосвязью или, в терминах G. Tononi, *системой* причинных связей, обладающих максимальной интегрированной информацией или, в нашем смысле, максимальным значением критерия K<sub>rit</sub>. Неподвижная точка сама формирует паттерн – набор признаков, составляющий неподвижную точку, который является прототипом у Eleanor Rosch и образом у Дж. Ст. Милля.

Специальным экспериментом показано, что данная задача не решается сетями Хопфилда, как оригинальной, так и взятой из системы MATLAB [10]. Поэтому наша формализация, отчасти, превосходит сети Хопфилда.

## 6. Заключение

Объединение когов функциональных систем и когов феноменального опыта осуществляется за счет замены вероятностных правил, используемых в функциональных системах на правила, включенные в неподвижные точки феноменального опыта, определяющие «контекст» их применения. Такая модель когнитивного опыта моделировать следующие когнитивные функции: восприятие [9-10], целенаправленное поведение и функциональные системы [2,30], организацию движений по А.Н. Бернштейну [4,30], эмоции и принятие решений [5]. На нейронном уровне гиперсеть когнитивного опыта может быть представлена нейронами, удовлетворяющими правилу Хебба, формальная модель которых описана в [33].

## Литература

1. Анохин К.В. Когнитом: в поисках общей теории когнитивной науки // Шестая международная конференция по когнитивной науке, Калининград, 2014, стр. 26–28.
2. Витяев Е.Е. Логика работы мозга // Подходы к моделированию мышления. М.: Эдиториал УРСС, 2014. С. 120–153.
3. Витяев Е.Е. Единая формализация «естественной» классификации, «естественных» понятий и сознания, как интегрированной информации по G. Tononi // Информационные технологии в гуманитарных исследованиях, Вып. 21. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2015. С. 5–14.
4. Витяев Е.Е. Объяснение Теории Движений Н.А. Бернштейна. VII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2005», Сборник научных трудов, часть 1, М: МИФИ, 2005. С. 234–240.
5. Витяев Е.Е. Принятие решений. Переключающая и подкрепляющая функции эмоций // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2006», Сборник научных трудов, М.: МИФИ, 2006. С. 24–30

## Формализация когнитива

6. Витяев Е.Е., Демин А.В., Пономарёв Д.К. Вероятностное обобщение формальных понятий // Программирование, 2012. Т. 38, № 5. С. 219–230.
7. Витяев Е.Е., Костин В.С. Естественная классификация, систематика, онтология // Информационные технологии в гуманитарных исследованиях. Вып. 13, Новосибирск: ИАЭТ СО РАН, 2009. С. 65–75
8. Витяев Е.Е., Мартынович В.В. Формализация «естественной» классификации и систематики через неподвижные точки предсказаний // Сибирские электронные математические известия. Т. 12, ИМ СО РАН, 2015. С. 1006–1031
9. Витяев Е.Е., Неупокоев Н.В. Формальная модель восприятия и образа как неподвижной точки предвосхищений // Подходы к моделированию мышления. М.: Эдиториал УРСС, 2014. С. 155–172.
10. Витяев Е.Е., Неупокоев Н.В. Математическая модель восприятия и образа. Информационные технологии в гуманитарных исследованиях, Вып.17, Новосибирск: ИАЭТ СО РАН, 2012. С. 63–72.
11. Забродин В.Ю. О критериях естественной классификации // НТИ, сер.2, 1981, №8.
12. Мейен С.В., Шрейдер С.А. Методологические аспекты теории классификаций // Вопросы философии, 1976, №12.
13. Рутковский Л. Элементарный учебник логики. Санкт-Петербург, 1884.
14. Смирнов Е.С. Конструкция вида таксономической точки зрения // Зоол. Журн. 1938. Т. 17, №3. С. 387–418.
15. Субботин А.Л. Классификация. М.: ИФ РАН, 2001.
16. Мухортов В.В., Хлебников С.В., Витяев Е.Е. Улучшенный алгоритм семантического вероятностного вывода в задаче 2-мерного анимата // Нейроинформатика. 2012. Т. 6, № 1. С. 50–62
17. Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical Foundations. Springer Verlag, 1999.
18. Demin A.V., Vityaev E.E. Learning in a virtual model of the *C. elegans* nematode for locomotion and chemotaxis // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2014. V.7. P. 9–14.
19. Friston K. The free-energy principle: a unified brain theory? Nature Reviews Neuroscience V.11. P. 127–138.
20. Masafumi O., Albantakis L., Tononi G. From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Integrated Information Theory 3.0 // PLOS Computational Biology, May 2014, V.10. Issue 5.
21. Mill J.S. System of Logic, Ratiocinative and Inductive. L., 1983.
22. Rehder B. Categorization as causal reasoning // Cognitive Science, 2003. V. 27. P. 709–748.
23. Rosch E.H. Natural categories // Cognitive Psychology V. 4. P. 328–350.
24. Rosch E., Mervis C.B. Family resemblances. Studies in the internal structure of categories // Cognitive Psychology, V. 7. P. 573–605.
25. Rosch E., Principles of categorization // Rosch E. & Lloyd B.B. (eds), Cognition and Categorization, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1978. P. 27–48
26. [http://www.math.nsc.ru/AP/ScientificDiscovery/index\\_rus.html](http://www.math.nsc.ru/AP/ScientificDiscovery/index_rus.html)
27. The Nature of Classification. Relationships and Kinds in the Natural Sciences. Palgrave Macmillan. 2013. 208p.
28. Tononi G. Information integration: its relevance to brain function and consciousness // Arch. Ital. Biol., 2010. V. 148. P. 299–322.
29. Tononi G. Integrated information theory of consciousness: an updated account. Arch. Ital. Biol., 2012. V. 150. P. 56–90.
30. Vityaev E. Purposefulness as a principle of brain activity // Anticipation: Learning from the Past. Cognitive Systems Monographs, V.25, Springer, 2015. P. 231–254.

Витяев Е.Е.

31. Vityaev E. Unified formalization of “natural” classification, “natural” concepts, and consciousness as integrated information by Giulio Tononi // The Sixth international conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures. Procedia Computer Science, 2015. V. 71, P. 169–177.
32. Vityaev E.E., Martinovich V.V. Probabilistic Formal Concepts with Negation // A. Voronkov, I. Virbitskaite (Eds.): PCI 2014, LNCS 8974, P. 385–399.
33. Vityaev E.E. A formal model of neuron that provides consistent predictions // Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012. In: Advances in Intelligent Systems and Computing. V.196, Springer, 2013. P. 339–344.

Статья поступила 24 мая 2016 г.  
После доработки 5 июня 2016 г.