



# OSTIS-2016

(Open Semantic Technologies for Intelligent Systems)

УДК 519.711.74

## НОВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ФОРМАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Жилякова Л.Ю.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
г. Москва, Россия*

**zhilyakova.ludmila@gmail.com**

В работе предпринята попытка обогатить аппарат искусственных нейронных сетей за счет усложнения модели формального нейрона. Рассматриваются не только электрические, но и химические его свойства: чувствительность к различным нейротрансмиттерам и способность их производить. Сеть из этих нейронов – гетерогенная структура, связи в которой зависят от химической ситуации в межклеточном пространстве, которое также является частью модели. В такой сети транзмиттеры могут играть решающую роль в формировании паттернов активности.

**Ключевые слова:** неоднородная нейронная сеть; паттерн активности; гетерохимический ансамбль; модель формального нейрона.

### Введение

Модель формального нейрона и нейронной сети была предложена У. Маккалоком и У. Питтсом [McCulloch, Pitts 1943]. Математически формальный нейрон – это пороговый элемент с единственным выходом, функция активации которого зависит от линейной комбинации всех входных сигналов. Изначально нейрон Маккалока–Питтса мог оперировать только бинарными сигналами: логическим нулем и логической единицей, однако в процессе развития нейронных сетей были предложены не только бинарные, но и непрерывные функции срабатывания. Нейронные сети успешно применяются в распознавании образов, классификации, кластеризации, прогнозировании, решении ряда вычислительных и оптимизационных задач.

В течение последнего десятилетия появились принципиально новые сетевые модели мозга. Их возникновение и большой всплеск количества исследований в этом направлении обусловлены сразу двумя факторами: появлением высокочувствительной регистрирующей техники, позволяющей получать большие качественные наборы данных, и появлением мощных компьютеров, способных эти данные обрабатывать. Оказалось, что сразу во многих биологических и социальных системах структура связей между их элементами описывается сложными сетями со сходными свойствами. Сети мозга не стали исключением. Теоретико-графовые исследования

сетей мозга получили названия «структурная и функциональная коннектомика» [Bullmore, Sporns 2009; Baronchelli et al 2013].

Искусственные нейронные сети и структурная коннектомика основываются на идее «проводочного мозга», в которой мозг представляется электрической сетью с жестко заданной топологией, которая образуется «проводами» (аксонами), соединяющими простые элементы (нейроны), причем, все нейроны одинаковы. Однако многие фундаментальные свойства, присущие живым нейронным сетям, в таких терминах описать невозможно. Современные исследования свидетельствуют о том, что нейроны не одинаковы – они являются транзмиттер-специфическими; и перестройка топологии сетей и изменение режимов активности нейронов происходят ad hoc – под действием нейротранзмиттеров [Bargmann, 2012; D'yakonova, 2014; Дьяконова, 2012; Сахаров, 2012].

Цель настоящей работы – описание формальной модели нейрона, обладающего не только электрическим зарядом, но и химическими входами и выходами. Сеть из таких нейронов будем называть гетерогенной нейронной сетью. При этом термин «сеть» не означает наличия лишь электрических связей – любая химическая связь в ней может быть отражена теми же математическими средствами.

# 1. Описание модели формального нейрона

## 1.1. Основные моделируемые свойства

В искусственных нейронных сетях формальный нейрон является пороговым суммирующим элементом, принимающим однородные сигналы и активирующимся в зависимости от линейной комбинации входов. Наша задача – обогатить эту модель некоторыми свойствами, присущими живым нейронам, и позволяющими реализовать новые функции, такие как выделение различных активных подсетей в зависимости от изменяющихся внешних условий и реализация на них паттернов циклической активности.

В данном разделе мы перечислим основные свойства естественных нейронов, которые станут объектами моделирования. Следует отметить, что все эти свойства претерпели ряд значительных упрощений в попытке выделить из них только информационно значимую составляющую. С этой оговоркой опишем процессы, происходящие при взаимодействии нейронов друг с другом и с окружающей средой.

Кроме электрических нейроны принимают химические сигналы, причем, их чувствительность к различным химическим веществам – нейротрансмиттерам (или нейромедиаторам) – зависит от наличия соответствующих рецепторов. Чем больше у нейрона рецепторов к определенному медиатору и чем выше их чувствительность, тем сильнее воздействие на него даже малых концентраций данного вещества.

В естественной нейронной сети нейроны находятся в среде, представляющей собой смесь нейротрансмиттеров, концентрации которых непрерывно изменяются: транзиттеры выбрасываются в синаптическую щель при передаче импульса, при этом часть из них попадает во внеклеточное пространство и воздействует на другие нейроны; часть транзиттеров утилизируется нейронами; часть приходит извне (см., напр., [Сукова, 2004]). Изменение соотношения концентраций веществ во внеклеточном пространстве воздействует на связи между нейронами, на очередность и скорость их активации, амплитуду и частоту спайков. Однако континууму состояний внеклеточного пространства соответствует конечное (и малое) число устойчивых состояний нейронной сети.

Диапазон медиаторов, к которым чувствителен единичный нейрон, достаточно широк. Один нейрон может иметь до нескольких десятков типов рецепторов. При этом, когда в нейроне происходит генерация спайка, он выпускает во внеклеточное пространство единичный транзиттер или транзиттерную смесь, состоящую из малого числа транзиттеров (в модели предполагается, что число типов в выбрасываемой смеси не более пяти). Объем этого выброса может изменяться в зависимости от силы спайка, но состав остается

всегда одним и тем же; кроме этого, если типов транзиттеров больше одного, их соотношение в смеси тоже постоянно.

В зависимости от химического состава внеклеточной среды изменяется чувствительность рецепторов нейронов. Вещество-антагонист некоторого транзиттера может блокировать соответствующие рецепторы. Рецепторы имеют разное т.н. сродство: способность захватывать транзиттер.

Рецепторы к одному и тому же транзиттеру не однотипны. Известно, как минимум, три разных типа рецепторов: возбуждающие (деполяризующие мембрану клетки), тормозные (гиперполяризующие мембрану) и метаболитные (изменяющие состояние клетки и влияющие на мембранный потенциал отложено).

Как правило, нейроны имеют рецепторы к тому транзиттеру, который сами выделяют. Таким образом, они управляют своей активностью за счет положительных или отрицательных обратных связей.

За счет комбинации в сети нейронов с различными типами рецепторов к одному и тому же транзиттеру достигается большое разнообразие паттернов активности. Переключение между ними происходит не только из-за воздействия новых веществ. При разных концентрациях одного и того же вещества оно может действовать на один и тот же нейрон как возбуждающе, так и тормозящее. Это зависит от количества активных рецепторов, которое может изменяться с изменением концентрации.

Таким образом, состояние нейрона с информационной точки зрения описывается значением мембранного потенциала, наличием рецепторов и их чувствительностью.

## 1.2. Определения и обозначения

Опишем нейроны как сложные узлы, способные находиться в разных состояниях.

В модели задано множество типов (цветов) фишек  $C = \{\bullet, \bullet, \dots, \bullet\}$ ,  $|C| = m$ . Цвета соответствуют типам транзиттеров. Узлы некоторое количество рецепторов для фишек [Жилиякова, 2015]. Рецепторы чувствительны к фишкам «своего» цвета. Узлы могут обладать разными наборами рецепторов.

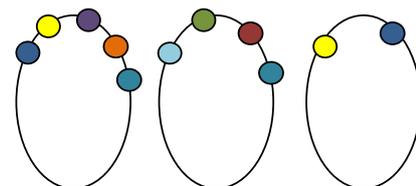


Рисунок 1 – Узлы с наборами рецепторов

Узлы могут принимать фишки в подходящие для них рецепторы.

При этом для каждого типа фишек существует три вида рецепторов:

- плюс-рецепторы (возбуждающие),
- минус-рецепторы (тормозные),
- ~-рецепторы (метаботропные) – на данном этапе построения модели они пока просто нейтральны.

Все рецепторы одного типа собраны в один слот. Их количество и чувствительность задаются весом слота (рисунок 2).

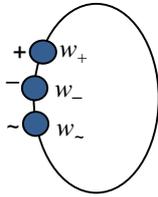


Рисунок 2 – Три вида слотов

Как правило, из трех весов слотов на рис.2 только один ненулевой. На каждый узел фишки определенного цвета имеют воздействие одного вида.

В сети вводится дискретное время  $t$ . На каждом такте слоты могут принимать фишки, после чего узел переходит в новое состояние и пересчитывает мембранный потенциал  $U(t)$ .  $U(t)$  – агрегированная величина, зависящая от состояния узла на такте  $t-1$  и от полученных на такте  $t$  фишек. Узлу приписывается пороговая величина мембранного потенциала  $U_T$ . Ее значение также может изменяться во времени:  $U_T = U_T(t)$ , но эти изменения относительно медленны. Если мембранный потенциал превысил пороговое значение, узел выстреливает фишками, что соответствует единичному спайку.

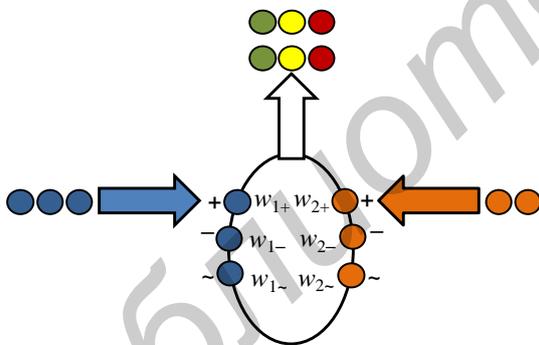


Рисунок 3 – Выброс фишек трех видов

Узел может выстреливать фишками с разной силой и периодичностью, но доля каждого вида фишек в смеси остается неизменной (рис. 4).

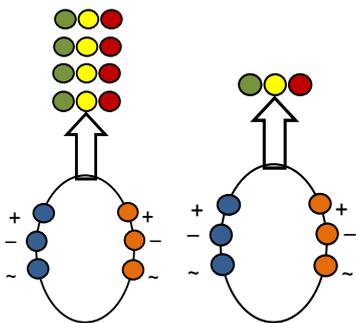


Рисунок 4 – Разные величины выбросов фишек

## 2. Организация нейронов в гетерохимические ансамбли

### 2.1. Внеклеточное пространство

Множество узлов, активируясь, выпускает наборы фишек, которые попадают во внеклеточное пространство (ВКП). В модели за ВКП отвечает выделенный (виртуальный) узел, который хранит выпущенные фишки. Этот узел связан со всеми остальными узлами (рис. 5).

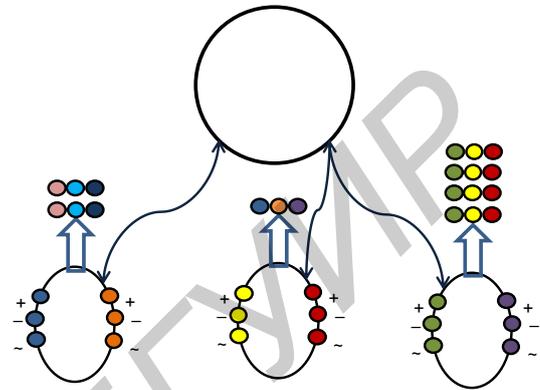


Рисунок 5 – Формальные нейроны и ВКП

Состав ВКП динамически изменяется. После того, как узлы выпустили фишки, они начинают их принимать. Если фишка принята, она исчезает из ВКП. Кроме того, в ВКП могут поступать фишки извне (рис. 6). В естественных сетях существуют дополнительные свойства утилизации фишек, однако на данном этапе они не реализованы в модели. При исследовании динамических процессов и моделировании изменения паттернов активности с большой вероятностью потребуются дополнительные механизмы отражения изменений в составе ВКП.

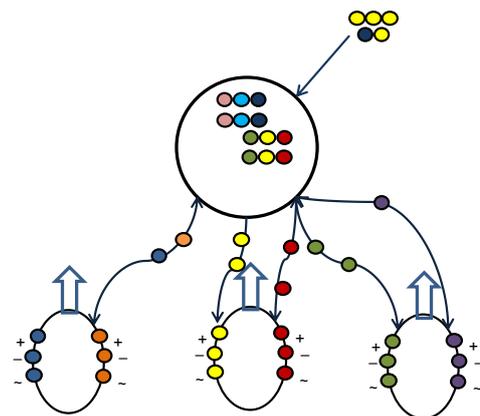


Рисунок 6 – Поступление фишек в слоты и изменение ВКП

### 2.2. Влияние состава ВКП на активность узлов

Преобладание в ВКП фишек некоторых типов включает одни наборы узлов сети и выключает другие. Таким образом, динамически формируются ансамбли из узлов. При этом между двумя узлами возникает ориентированная связь, если первый выстреливает определенными фишками, а второй имеет слот такого же типа. Эти раскрашенные

виртуальные связи делятся на усиливающие и тормозные. Сеть, построенная на таких принципах, обладает большой пластичностью и может по-разному реагировать на различные составы ВКП. Каждый информационно значимый в этой сети тип фишек (тип, к которому имеются слоты) может выделить свою подсеть (рис. 7).

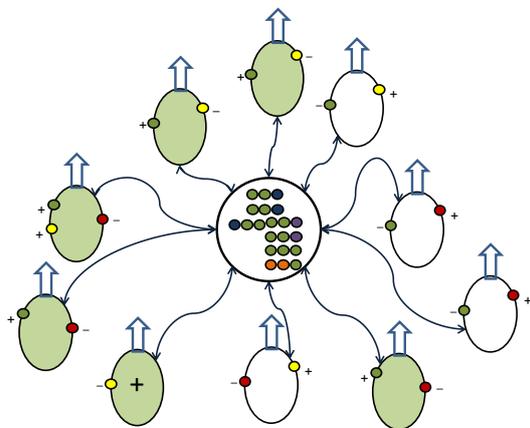


Рисунок 7 – Активация подсети отдельным типом фишек

Единичные фишки и определенные комбинации двух и более фишек могут задавать различные паттерны ритмической активности в такой сети.

Первоочередная задача, стоящая перед нами – обращение цикла трехфазного генератора с помощью различного состава ВКП. Схематически эта задача представлена на рис. 8.

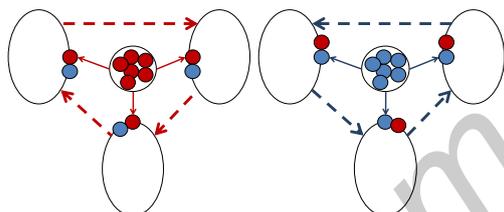


Рисунок 8 – Обращение обхода узлов в цикле

## Заключение

В настоящей работе предложена модель формального нейрона, способного поддерживать не только электрические, но и химические взаимодействия. Описан аппарат объединения таких нейронов в разноцветные сети. Работа находится на начальной стадии, и разработка формального аппарата для реализации описанных в первой части доклада желаемых свойств – предмет будущих исследований. Однако хотелось бы отметить, что эти исследования ведутся достаточно интенсивно и мы надеемся, что эти результаты не заставят себя ждать.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 14-01-00422а, 15-07-02488а).

## Библиографический список

- [Bargmann, 2012] Bargmann, C.I. Beyond the connectome: how neuromodulators shape neural circuits. *Bioessays* 34, 458–465 (2012).  
 [Baronchelli et al, 2013] Baronchelli, A., Ferrer-i-Cancho, R., Pastor-Satorras, R., Chater, N., Christiansen, M.H. Networks in

*Cognitive Science // Trends in Cognitive Sciences*. July 2013, Vol. 17, No. 7

[Bullmore, Sporns, 2009] Bullmore, E. Sporns, O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems // *Nature Reviews Neuroscience* 10, 186-198 (March 2009).

[D'yakonova, 2014] D'yakonova, V.E. Neurotransmitter mechanisms of context-dependent behavior. *Neurosci. Behav. Physiol.* 44, 256–267 (2014).

[McCulloch, Pitts, 1943] McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bull. Math. Biophys.*, 1943, v.5, pp.115-133. (Рус. пер. Маккаллоу У.С., Питтс У. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности. // В кн. Автоматы. Под ред. К.Э.Шеннона и Дж.Маккарти. М., ИЛ, 1956, с. 362-384).

[Sykova, 2004] Sykova E. Extrasynaptic volume transmission and diffusion parameters of the extracellular space // *Neuroscience*. 2004; 129(4). P. 861-76.

[Дьяконова, 2012] Дьяконова В.Е. Нейротрансмиттерные механизмы контекст-зависимого поведения // *Журнал высшей нервной деятельности*, 2012, том 62, № 6. С. 1–17.

[Жилиякова, 2015а] Жилиякова Л.Ю. Сетевая модель распространения активности в среде гетерогенных автоматов / *Материалы V международной научно-технической конференции "Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем OSTIS-2015"*. Минск: БГУИР, 2015. С. 303-308.

[Жилиякова, 2015б] Жилиякова Л.Ю. Сетевая модель распространения нескольких видов активности в среде сложных агентов и её приложения // *Онтология проектирования*. 2015. Том 5. №3(17). С. 278-296.

[Сахаров, 2012] Сахаров Д.А. Биологический субстрат генерации поведенческих актов // *Журнал общей биологии*. Том 73, № 5, Сентябрь-октябрь, 2012. С. 334–348.

## A NEW APPROACH TO MODELING OF ARTIFICIAL NEURONS AND THEIR INTERACTION

Zhilyakova L. Yu.

*Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[zhilyakova.ludmila@gmail.com](mailto:zhilyakova.ludmila@gmail.com)

An attempt to enrich the apparatus of artificial neural networks adding the extra properties to the formal neuron model is undertaken. We consider not only the electrical but also its chemical properties: sensitivity to different neurotransmitters and the ability to produce them. A network of complex neurons is a heterogeneous structure, in which connections depend on the chemical situation in the intercellular space, which is also part of the model. In such a network transmitters can play a crucial role in shaping patterns of activity.

## Keywords

Heterogeneous neural network; pattern of activity; heterochemical ensemble; formal neuron model.