

DOI: 10.25205/978-5-4437-1843-9-185

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНАПТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ И ФУНКЦИЙ КЛЕТОК МОЗЖЕЧКА С ПОМОЩЬЮ ИХ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

RESEARCH ON SYNAPTIC CONNECTIONS AND FUNCTIONS OF CEREBELLUM CELLS USING COMPUTER MODELING

А. С. Яровой¹, А. П. Синицина¹, В. А. Цвелая^{1,2}, В. Л. Дунин-Барковский³¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный²Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М. Ф. Владимирского³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», МоскваA. S. Yarovoy¹, A. P. Sinitsyna¹, V. A. Tsvelaya^{1,2}, W. L. Dunin-Barkowski³¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny²Vladimirsky Moscow Regional Research and Clinical Institute³National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow

✉ saturn1659@gmail.com

Аннотация

Модели, основанные на нейронной активности, могут использоваться в системах управления, разработке нейронных сетей и вычислительных экспериментах. В настоящей работе рассматривается разработка компьютерной модели группы клеток в мозжечке, образующих контур с обратной положительной связью. Результаты работы в дальнейшем будут использоваться для разработки ИИ-систем и вычислительных экспериментов *in silico*.

Abstract

Models based on neural activity can be used in control systems, neural network development, and computational experiments. This paper discusses the development of a computer model of a group of cells in the cerebellum that form a positive feedback loop. The results of this work will be further used for the development of AI systems and *in silico* computational experiments.

Модель, основанная на клеточной структуре и синаптических связях мозжечка, может значительно улучшить точность предсказаний и адаптивность ИИ-систем благодаря более эффективным способам обучения и настройки весов. Также моделирование обработки сенсорной информации мозжечком имеет потенциал для создания более точных когнитивных систем, которые могут использоваться для разработки биоморфных систем управления. Модель нейронной активности в мозжечке может использоваться в вычислительных экспериментах, когда постановка эксперимента *in vivo* затруднена или невозможна.

Основной целью работы является разработка модели искусственной нейронной сети на основе клеточной структуры и синаптических связей в мозжечке. Для этого было смоделировано взаимодействие между гранулярными клетками, лианной клеткой, клеткой Пуркинье и клетками ядер в замкнутом контуре с биологической обратной связью. Помимо этого, были рассмотрены несколько способов реализации пластических связей между гранулярными и клетками Пуркинье.

Контур положительной обратной связи состоит из клеток Пуркинье, оказывающих тормозное воздействие на малые клетки ядер, которые, в свою очередь, тормозят лианные клетки, возбуждающие по лианным волокнам клетки Пуркинье (рис. 1) [1]. Данный контур моделировался с помощью программной среды Nest Simulator, которая широко используется в вычислительной нейробиологии.

Вначале было смоделировано взаимодействие между гранулярными клетками и клеткой Пуркинье. 300 гранулярных клеток в случайный момент времени активировались с частотой от 10 до 100 Гц дважды за симуляцию, которая длилась 500 мс [2]. Это позволило подобрать начальные веса, при которых частота спайков на клетке Пуркинье была около 50 Гц.

После этого в модель были добавлены малые клетки ядер и лианные клетки. Биофизические параметры всех клеток были взяты из источников [3–5]. Для точного отражения свойств нейронов разных типов использовалась модель спайковой активности нейронов Conductance-based generalized leaky integrate and fire (glif_cond). У всех клеток была фоновая активность, реализованная с помощью встроенных инструментов: генераторов спайков и генераторов постоянного тока. В результате была успешно реализована положительная обратная связь

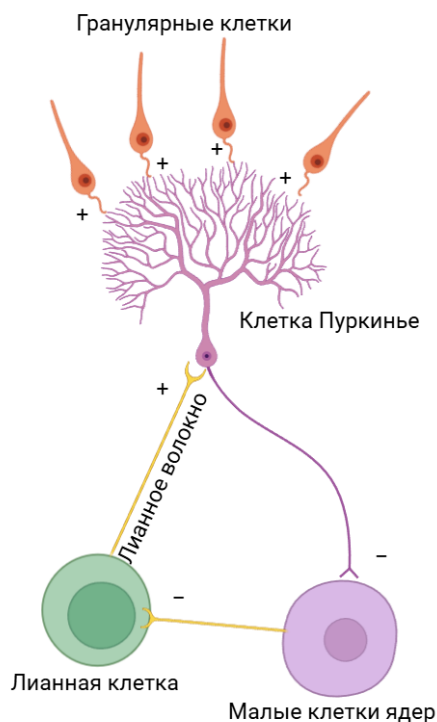


Рис. 1. Контур с обратной положительной связью в мозжечке

в контуре. При возбуждении клетки Пуркинье на малые клетки ядер (далее МКЯ) поступал тормозной сигнал, который менял напряжение на модельных клетках и снижал частоту спайков (рис. 2). Так, первые 100 мс симуляции множество спайков клетки Пуркинье не давали МКЯ возбудиться, а фоновая активность в остальное время тормозила МКЯ. Аналогичную активность создают МКЯ на синапсах лианных клеток.

Далее было необходимо реализовать пластическую связь между гранулярными клетками и клетками Пуркинье. Эти синапсы реализуют как долговременную депрессию, так и потенциацию, обе формы которых лежат в основе сенсомоторного обучения [6]. Для реализации данной связи использовались уравнения из статьи [1]. В результате в модельных условиях веса сходились к константе. Дополнительно были рассмотрены возможности использования встроенных в Nest Simulator типов синапсов. Наиболее подходящими для описания пластичной связи оказались `stdp_synapse` и `tsodyks_synapse`.

Таким образом, была разработана модель контура в мозжечке с положительной обратной связью и пластичными синапсами. Результаты работы в дальнейшем будут использоваться для разработки биоморфных нейронных сетей нового поколения и вычислительных экспериментов *in silico*.

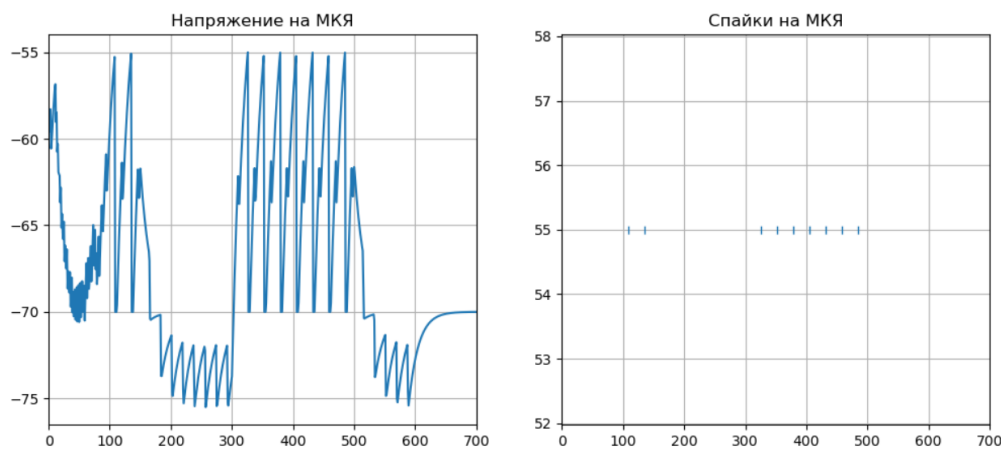


Рис. 2. Напряжение (слева) и количество спайков (справа) на МКЯ (по оси абсцисс время симуляции в мс)

Литература

1. Dunin-Barkowski W.L. Analysis of output of all Purkinje cells controlled by one climbing fiber cell // *Neurocomputing*. 2002. Vol. 44–46. P. 391–400.
2. Shakirov V. et al. Cerebellar plasticity based equalization of total input to inferior olive cells // *Neurosci. Behavioral Physiol*. 2023. Vol. 53. P. 739–751.
3. Chadderton P. et al. Integration of quanta in cerebellar granule cells during sensory processing // *Nat*. 2004. Vol. 428. P. 856–860.
4. Devor A., Yarom Y. Generation and Propagation of Subthreshold Waves in a Network of Inferior Olivary Neurons // *J. Neurophysiol*. 2002. Vol. 87. P. 3059–3069.
5. Uusisaari M. et al. Morphological and Electrophysiological Properties of GABAergic and Non-GABAergic Cells in the Deep Cerebellar Nuclei // *J. Neurophysiol*. 2007. Vol. 97. P. 901–911.
6. Voerman S. et al. Plasticity mechanisms of genetically distinct Purkinje cells // *BioEssays*. 2024. Vol. 46. P. e2400008.