

NEVRONLARDA SIGNAL TARQALISHINING FIZIK TAMOYILLARI

Y.K. Sattarov¹Sh.A. Yo'ldoshaliyeva²

Toshkent Davlat Tibbiyot Universiteti, Toshkent, O'zbekiston

Informatika va biofizika kafedrası, assistenti¹2-son davolash ishi, I bosqich talabasi²<https://doi.org/10.5281/zenodo.17612580>

Annotatsiya. Ushbu ilmiy ishda neyronlarda signal tarqalishining fizik tamoyillari, ya'ni aksiyon potentsialning paydo bo'lishi, membrana potentsialining o'zgarishi, ion kanallari orqali ion oqimlarining boshqarilishi va sinaptik uzatish mexanizmlari tahlil qilinadi. Tadqiqot neyron tarmoqlarida signal uzatishning elektromexanik va elektrokimyoviy asoslarini, shuningdek, bu jarayonlarning miya faoliyati va neyrobiologik funksiyalar bilan bog'liqligini yoritadi.

Tadqiqotning asosiy maqsadi — signal tarqalishining fizik mexanizmlari va ularning nevrofiziologik xususiyatlarini aniqlash, shuningdek, ushbu bilimlarni klinik va eksperimental nevrobiofizika sohalarida qo'llash imkoniyatlarini aniqlashdir. Ishda neyron membranalarining elektr xossalari, ion oqimlarining dinamikasi va neyron tarmoqlaridagi vaqt-va-makonsal tarqalish hodisalari ilmiy uslubda tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, aksiyon potentsialining boshlanishi va propagatsiyasi neyron membranasining passiv va aktiv xususiyatlariga, ion kanallarining o'zaro muvofiqligiga va sinaptik bog'lanishlarga bog'liq. Shu bilan birga, signal tarqalishining fizik tamoyillari neyron tarmoqlarida ma'lumot uzatish samaradorligini va miya funksiyalarining sezuvchanligini belgilovchi muhim mexanizm sifatida namoyon bo'ladi. Ushbu ilmiy ishning ilmiy yangiligi shundan iboratki, u neyronlarda signal tarqalishining fizik va elektromexanik asoslarini kompleks tarzda yoritadi va ushbu bilimlarni eksperimental tadqiqotlar hamda klinik neyrobiologiya amaliyotida qo'llashga imkon yaratadi.

Ishning amaliy ahamiyati esa, nevrologiya, neyrorehabilitatsiya va sun'iy neyron tarmoqlarini ishlab chiqish sohalarida fizik tamoyillarni nazariy asos sifatida ishlatish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: Neyron, aksiyon potentsial, membrana potentsiali, ion kanallari, sinaptik uzatish, elektromexanika, signal propagatsiyasi, nevrobiofizika.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В НЕЙРОНАХ

Аннотация. В данной научной работе рассматриваются физические принципы распространения сигнала в нейронах, включая генерацию потенциала действия, изменение мембранного потенциала, управление ионными потоками через ионные каналы и механизмы синаптической передачи. Исследование освещает электрохимические и электрохимические основы передачи сигналов в нейронных сетях, а также их связь с функциями мозга и нейробиологическими процессами. Основная цель работы — выявить физические механизмы распространения сигнала и их нейрофизиологические характеристики, а также определить возможности применения этих знаний в клинической и экспериментальной нейробиофизике. В исследовании проанализированы электрические свойства нейронной мембраны, динамика ионных потоков и временно-пространственные процессы передачи сигналов в нейронных сетях. Результаты исследования показали, что генерация и распространение потенциала действия зависят от пассивных и активных свойств мембраны нейрона, координации ионных каналов и синаптических связей. Физические принципы распространения сигналов выступают

ключевым механизмом, определяющим эффективность передачи информации и чувствительность функций мозга. Научная новизна работы заключается в комплексном освещении физических и электромеханических основ передачи сигналов в нейронах и возможности применения этих знаний в экспериментальных исследованиях и клинической нейробиологии. Практическая значимость состоит в использовании физических принципов в неврологии, нейрореабилитации и разработке искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: нейрон, потенциал действия, мембранный потенциал, ионные каналы, синаптическая передача, электромеханика, распространение сигнала, нейробиофизика.

PHYSICAL PRINCIPLES OF SIGNAL PROPAGATION IN NEURONS

Abstract. This scientific study examines the physical principles of signal propagation in neurons, including the generation of action potentials, changes in membrane potential, the regulation of ionic currents through ion channels, and synaptic transmission mechanisms. The research highlights the electromechanical and electrochemical bases of signal transmission in neural networks and their relationship with brain function and neurobiological processes.

The main objective of the study is to identify the physical mechanisms of signal propagation and their neurophysiological characteristics, as well as to explore the potential applications of this knowledge in clinical and experimental neurobiophysics. The study analyzes the electrical properties of neuronal membranes, the dynamics of ionic currents, and the spatiotemporal patterns of signal propagation within neural networks.

The results indicate that the initiation and propagation of action potentials depend on the passive and active properties of neuronal membranes, the coordination of ion channels, and synaptic connectivity. The physical principles of signal propagation serve as a critical mechanism determining information transfer efficiency and the sensitivity of brain functions.

The scientific novelty of this work lies in the comprehensive examination of the physical and electromechanical bases of neuronal signal propagation and the potential application of this knowledge in experimental studies and clinical neurobiology. The practical significance includes using these physical principles in neurology, neurorehabilitation, and the development of artificial neural networks.

Keywords: neuron, action potential, membrane potential, ion channels, synaptic transmission, electromechanics, signal propagation, neurobiophysics.

Kirish

Neyronlarda signal propagatsiyasi markaziy asab tizimining funksional faoliyatida asosiy rol o'ynaydi, chunki aksiyon potensial va sinaptik uzatish mexanizmlari orqali ma'lumotlar tez va samarali tarzda uzatiladi [1]. Ushbu jarayon miya va orqa miya neyronlarining tarmoqlanishi va funksional integratsiyasini ta'minlaydi, shu bilan birga kognitiv, motor va sezgi funksiyalarining normal ishlashini qo'llab-quvvatlaydi [2].

Neyron membranasining elektr xossalari va ion kanallari orqali sodir bo'ladigan ion oqimlarining dinamikasi signal tarqalishining fizik asosini tashkil qiladi [3]. Membranadagi potensial farqlari va ion kanallarining faoliyati aksiyon potensialining boshlanishi, amplituda va chastotasini belgilaydi, bu esa neyronlararo axborot uzatish sifatini bevosita ta'sir qiladi [4].

Shuningdek, neyron tarmoqlarining morfologik xususiyatlari propagatsiya tezligi va samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi [5].

Dendrit uzunligi, diametri, sinaptik bog‘lanishlar va akson konusining shakli aksiyon potensialining tarqalish tezligi va mexanizmlarini aniqlashda muhim parametrlar hisoblanadi [6].

Kabel nazariyasi va membrana kapasitansi kabi fizik modellar ushbu jarayonlarni tushuntirishda keng qo‘llaniladi [7].

Signal tarqalishining vaqt-va-makon xususiyatlari neyronlararo o‘zaro ta’sir va tarmoq tuzilishi bilan bevosita bog‘liq bo‘lib, propagatsiyaning samaradorligi va axborot uzatish aniqligini belgilaydi [8]. Shu sababli, neyronlarda signal tarqalishining fizik mexanizmlarini, ion kanallari va membrana xossalari roli, shuningdek, tarmoq morfologiyasining propagatsiyaga ta’sirini o‘rganish nevrofiziologik jarayonlarni va klinik hamda eksperimental nevrobiofizik tadqiqotlarni chuqur tushunishda muhim ahamiyat kasb etadi [9].

Materiallar va metodlar

Tadqiqot materiali sifatida neyron membranasi va ion kanallarining fizik xossalari, dendrit va akson morfologiyasi hamda sinaptik bog‘lanishlarning strukturalari o‘rganildi.

Tadqiqotda asosan mammal neyronlari, jumladan inson va sichqon miyasi neyronlari bo‘yicha eksperimental va nazariy ma’lumotlar tahlil qilindi. Shu bilan birga, neyron tarmoqlaridagi signal tarqalishi va propagatsiya tezligi haqidagi mavjud empirik tadqiqotlar ham material sifatida qo‘llanildi.

Tadqiqot metodlari orasida analitik yondashuv asosiy o‘rin tutadi; bunda neyron membranasi elektr xossalari, ion oqimlarining dinamikasi va aksiyon potensialining propagatsiyasi fizik jihatdan tahlil qilindi. Konseptual metod orqali signal tarqalishining fizik mexanizmlari, membrana kapasitansi va kabel nazariyasi kabi modellar integratsiyalangan holda o‘rganildi.

Shuningdek, komparativ metod qo‘llanilib, turli hayvon turlaridagi neyron morfologiyasi va signal tarqalish tezligi solishtirildi, bu esa fiziologik va struktural parametrlarning propagatsiyaga ta’sirini aniqlash imkonini berdi. Sistemali yondashuv yordamida neyronlararo tarmoq aloqalari, sinaptik bog‘lanishlar va aksiyon potensialining vaqt-va-makonsal xossalari birlashtirilgan tarzda tahlil qilindi.

Amaliy jihatdan, vaziyat tahlili (case study) va modellashtirish metodlari yordamida aksiyon potensialining propagatsiyasi va ion kanallari faoliyatining neyron tarmoqlaridagi o‘rni baholandi. Shu bilan birga, natijalarni klinik va eksperimental nevrofiziologik tadqiqotlar bilan solishtirish orqali metodologik barqarorlik ta’minlandi.

Natijalar va ularning muhokamasi

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, aksiyon potensialining boshlanishi va propagatsiyasi neyron membranasi passiv va aktiv xususiyatlariga, ion kanallarining joylashuvi va faoliyatiga bevosita bog‘liq. Membranadagi potensial farqlari va ion oqimlarining dinamikasi aksiyon potensialining amplituda va chastotasini belgilab, signal uzatish samaradorligini aniqlaydi. Shu bilan birga, dendrit va akson morfologiyasi propagatsiya tezligi va tarmoq samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

Signal tarqalishining vaqt-va-makon xususiyatlari tahlil qilganda, propagatsiya tezligi dendrit uzunligi, diametri va sinaptik bog‘lanishlar bilan bevosita bog‘liqligi aniqlangan. Bundan tashqari, aksiyon potensialining qayta faollashuvi va membrana kapasitansi kabel nazariyasi asosida tushuntiriladi, bu esa fizik mexanizmlarni chuqurroq tushunishga imkon beradi.

Komparativ tahlillar shuni ko‘rsatdiki, turli hayvon turlaridagi neyron morfologiyasi va signal tarqalish tezligi sezilarli farq qiladi. Masalan, inson neyronlarida propagatsiya tezligi sichqon neyronlariga nisbatan yuqori bo‘lib, bu murakkab kognitiv funksiyalar bilan bog‘liqdir.

Shu nuqtai nazardan, neyron tarmoqlarining strukturalari va morfologiyasi signal uzatish samaradorligini belgilovchi asosiy omillar sifatida namoyon bo'ladi.

Shuningdek, tadqiqot natijalari signal propagatsiyasining klinik va eksperimental nevrofiziologik tadqiqotlar uchun amaliy ahamiyatini tasdiqlaydi. Fizik tamoyillarni tushunish, ion kanallarining roli va membrana xossalari asosida, neyron tarmoqlaridagi patologik holatlar, masalan, epilepsiya yoki neyrodegenerativ kasalliklar paydo bo'lish mexanizmlarini aniqlash va sun'iy neyron tarmoqlarini ishlab chiqishda amaliy tavsiyalar berishga imkon yaratadi.

Xulosalar

Ushbu ilmiy ish neyronlarda signal tarqalishining fizik tamoyillari, aksiyon potensialining boshlanishi va propagatsiyasi, membrana xossalari va ion kanallari faoliyatining nevrofiziologik jarayonlarga ta'sirini kompleks tarzda tahlil qildi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, signal propagatsiyasi neyron membranasining passiv va aktiv xususiyatlari, dendrit va akson morfologiyasi hamda sinaptik bog'lanishlarning o'zaro ta'siri orqali aniqlanadi.

Aksiyon potensialining chastotasi, amplitudasi va qayta faollashuvi fizik tamoyillar — kabel nazariyasi, membrana kapasitansi va ion oqimlari — orqali tushuntiriladi. Shu bilan birga, propagatsiya tezligi va samaradorligi tarmoq morfologiyasi va neyronlararo bog'lanishlarga bog'liq bo'lib, bu bilimlar signal uzatishning fiziologik va klinik ahamiyatini aniqlashga yordam beradi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, neyronlarda signal propagatsiyasini tushunish faqat nazariy ahamiyatga ega bo'lib qolmay, balki klinik nevrofiziologiya, neyrorehabilitatsiya va sun'iy neyron tarmoqlarini ishlab chiqishda amaliy qo'llaniladigan asosiy ilmiy tamoyil sifatida xizmat qiladi. Shu tarzda, tadqiqot inson miyasi va neyron tarmoqlarining murakkab mexanizmlarini tushunishga, patologik holatlarni aniqlashga va texnologik yondashuvlarni optimallashtirishga hissa qo'shadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Thinking About the Nerve Impulse” — Frontiers in Cellular Neuroscience. Frontiers Link: <https://www.frontiersin.org/journals/cellular-neuroscience/articles/10.3389/fncel.2019.00208/full>
2. “The Principles of Nerve Cell Communication” — PMC (NCBI). PubMed Central Link: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6826821/>
3. “Technologies to Study Action Potential Propagation With a Focus on Axon Physiology” — Frontiers in Cellular Neuroscience. Frontiers Link: <https://www.frontiersin.org/journals/cellular-neuroscience/articles/10.3389/fncel.2019.00159/full>
4. “Action potential initiation and propagation: upstream influences on neurotransmission reliability” — PMC (NCBI). PubMed Central Link: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2661755/>
5. “Ion Channels and the Electrical Properties of Membranes” — NCBI Bookshelf. NCBI Link: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK26910/>
6. “Differences in action potential propagation speed and axon initial segment plasticity between rats and mice” — PMC (NCBI). PubMed Central Link: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9336440/>
7. “Uncertainty Propagation in Nerve Impulses Through the Action Potential Mechanism” — SpringerOpen (The Journal of Mathematical Neuroscience). SpringerOpen

Link: <https://mathematical-neuroscience.springeropen.com/articles/10.1186/2190-8567-5-3>

8. “Brain state limits propagation of neural signals in laminar cortical circuits” — PNAS.
PNAS

Link: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2104192119>

9. “Ion channels are key elements in the control of membrane physiology and neurotransmission because ionic fluxes assure neuronal signal propagation” — MDPI, Life.
MDPI

Link: <https://www.mdpi.com/2075-1729/14/6/758>