

УДК 612.014.42

## **BIOELECTRIC POTENTIALS: MECHANISMS OF EMERGENCE AND FUNCTIONING; BIOLOGICAL ROLE**

PATLUN D.V., KISLOVA O.V.

*Kyiv National University of Technologies and Design  
m-sharingan1@mail.ru*

The emergence of bioelectric potentials is the basis of the normal life of any cell and is particularly important for the excitation and inhibition processes in living organisms. Biopotentials are caused by the motion of ions (sodium, potassium, calcium, chlorine) through special hard-organized ion channels in the membrane, and the diffusion of ions in the intercellular and intracellular environments. At the excitation time the cell membrane becomes permeable to sodium ions, rapidly entering the cell, and the cell membrane recharges. Disorders of cell membranes conductivity can lead to serious organism pathologies (including death). Studies of bioelectric potentials are widely used in electrophysiology for testing potential drugs and also in medicine for diagnostic purposes.

## **БІОЕЛЕКТРИЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ: МЕХАНІЗМ ВИНИКНЕННЯ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ; БІОЛОГІЧНА РОЛЬ**

ПАТЛУН Д.В., КИСЛОВА О.В.

*Київський національний університет технологій та дизайну  
m-sharingan1@mail.ru*

Виникнення біопотенціалів лежить в основі нормальної життєдіяльності будь-якої клітини та є особливо важливим для процесів збудження і гальмування у живих організмах. Біопотенціали і біоструми обумовлені рухом не електронів, а іонів (переважно натрію, калію, кальцію, хлору) через спеціальні складно організовані іонні канали в мембрані, а також дифузією іонів в міжклітинному та внутрішньоклітинному середовищах. Механізм перезарядження полягає в тому, що в момент збудження мембрана клітини стає на короткий час проникною для іонів натрію, які швидко входять в клітину та перезаряджають мембрану. Порушення провідності клітинних мембран може призводити до серйозних патологій організму. Дослідження біоелектричних потенціалів широко застосовують в електрофізіології для тестування потенційних ліків, а також в медицині з діагностичними цілями.

Живі організми, включаючи організм людини, є виключно складними системами, діяльність яких забезпечується різноманітними процесами – фізичними, хімічними, біологічними, які регулюють внутрішні умови функціонування організмів, їх відтворення, розумову діяльність людини і багато іншого. В основі реалізації цих процесів лежать електричні явища на молекулярному та клітинному рівні [1,2].

### **Відкриття клітинних потенціалів**

Уявлення про існування зв'язку між електрикою та живою природою з'явилися набагато раніше винайдення першого джерела струму. І відбулося це, зокрема, завдяки риbam, що виробляють електричний струм. Ще в трактаті античного філософа Платона знаходяться перші згадки про вироблення скатами електричного розряду. Але справжній розвиток електричного вчення відбувся дуже пізно – в кінці XVIII ст., коли французький вчений Луїджі Гальвані випадково винайшов першу гальванічну систему, яку помилково прийняв за м'язову електричну роботу. Через деякий час його співвітчизник Алессандро Вольта прийшов до думки, що в основі «живої електрики» лежать хімічні процеси, і створив прообраз звичних для нас батарейок [1,3].

Роботи англійського зоолога Джона Юнга та його послідовників - професора Ендрю Хакслі і його учня Алана Ходжкіна довели, що електричний заряд сконцентрований на неушкодженій клітині в стані спокою. Для цього вони помістили один електрод всередину нервового волокна головноного молюска, а інший залишили на його поверхні. Вже через 0,0003 секунди було зареєстровано електричний імпульс з живої клітини. Згодом виявилось, що всі клітини заряджені і заряд мембрани є невід'ємним атрибутом її життя. Поки клітина жива, у неї є заряд [1].

### **Сучасна теорія біоелектричних потенціалів**

Як відомо, наш організм складається на 70% з води, а точніше, з розчину солей і білків. Всередині клітини міститься приблизно в 50 разів більше іонів  $K^+$ , ніж за її межами. В міжклітинному просторі переважають іони  $Na^+$  (тут їх приблизно в 20 разів більше, ніж в клітині). Такий нерівномірний розподіл підтримується клітинною мембраною. Вона складається з двох фосфоліпідних шарів, товщу яких пронизують білки, що виконують різноманітні функції та, зокрема, є високоспецифічними каналами для кожного типу іонів.

Коли клітина знаходиться в стані спокою, іони  $K^+$  здатні безперешкодно виходити за межі клітини через свої канали. Іони  $Na^+$  не мають такої можливості, оскільки всі мембранні канали є закритими [4].

У живих організмах іони  $K^+$  або  $Na^+$  завжди знаходяться з аніонами кислот –  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$  і т. д. В звичайних умовах мембрана є непроникною для негативно заряджених частинок. Це означає, що коли іони  $K^+$  рухаються через свої канали, пов'язані з ними аніони скупчуються на внутрішній поверхні мембрани. Оскільки в міжклітинному просторі переважають іони  $Na^+$  та до них постійно просочуються іони  $K^+$ , на зовнішній поверхні мембрани концентрується надлишковий позитивний заряд, а на її внутрішній поверхні - негативний. Клітинна мембрана поляризується за рахунок різниці зарядів по обидві її сторони. Заряд в стані спокою клітини називають мембранним потенціалом спокою, який дорівнює приблизно -70 мВ [2].

Після з'ясування механізму виникнення клітинного потенціалу постало питання використання цієї електрики при функціонуванні організму. Коли клітина реагує на зовнішні або внутрішні подразнення, блискавично відкриваються мембранні канали і позитивні іони спрямовуються всередину клітини. А аніони, що перебували всередині клітини, - за її межі. Таким чином, в збудженій клітині іони дифундують, врівноважуючи свою концентрацію по обидві сторони мембрани. Тепер вже всередині клітини, а саме на внутрішній поверхні мембрани, концентрується надлишковий позитивний заряд, а на її зовнішній поверхні буде сконцентрований негативний заряд. В момент порушення клітини спостерігається реверсія заряду, тобто зміна його знаку на протилежний. Частина свого заряду клітина втрачає і під час роботи.

Отже, заряд існує тільки тоді, коли є різниця між концентраціями іонів  $Na^+$  /  $K^+$ . При збудженні клітини чисельність іонів  $Na^+$  по обидві сторони мембрани однакова, до цього ж стану прагне і  $K^+$  [4].

Згодом постало питання, як клітина відновлює свій стан. З'ясували, що існує спеціальний білок, вбудований в мембрану. Він використовував для здійснення роботи певну кількість енергії, яка накопичувалась у вигляді молекул АТФ (аденозинтрифосфатної кислоти). Ці молекули спеціально синтезуються в «енергетичних станціях» клітини - мітохондріях, дбайливо там зберігаються і при необхідності за допомогою спеціальних переносників доставляються до місця призначення. Енергія з цих молекул вивільняється при їх розпаді і витрачається на різні потреби клітини.

Зокрема, в нашому випадку, ця енергія потрібна для роботи білка -  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  - АТФази, основна функція якого полягає в тому, щоб переміщувати іони  $\text{Na}^+$  назовні з клітини, а  $\text{K}^+$  - в зворотному напрямку. Отже, коли клітина працює, то на рівні клітинної мембрани цей процес протікає пасивно, а для того, щоб відпочити, їй потрібна енергія [4].

Подібним чином відбувається і передача нервових імпульсів у організмі. Збудження, яке виникає у місці подразнення, поширюється далі по ланцюжку, але тепер подразником для сусідніх ділянок буде не зовнішня дія, а внутрішні процеси, викликані потоками іонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$  і зміною заряду мембрани. Біоструми по мембрані нервового волокна поширюються круговими хвилями, викликаючи збудження все більш віддалених ділянок [2]. Передача нервових імпульсів здійснюється однонапрямлено через велику витрату енергії на відновлення заряду.

### **Біологічна роль клітинних потенціалів**

Загалом величина електричних зарядів в організмі, як і їх походження, нерозривно пов'язана з обміном речовин, з інтенсивністю окисно-відновних процесів. Окремі ділянки органів і тканин можуть набувати різних зарядів. Пошкоджені ділянки бувають заряджені негативно щодо неушкоджених. Такий заряд має сухожилля по відношенню до м'язів, корінь - по відношенню до стебла і листя.

Біоелектричні струми виявлені в усіх органах і тканинах людини. Вони виникають в серці при скороченні і розслабленні м'язів. Скорочене серце має негативний потенціал, розслаблене - позитивний. В одному з останніх досліджень були виявлені п'єзоелектричні властивості кісткової тканини, тобто генерації в ній електрики при механічному впливі (наприклад, при навантаженні під час ходіння). Відомо, коли кісткова тканина не відчуває регулярного навантаження, то її механічні властивості втрачаються [2].

Такі електричні імпульси майже не помітні у навколишньому середовищі. Але існує значна кількість організмів, які здатні генерувати струми з великою силою. Нині відомо близько 300 видів риб, що здатні виробляти сильні електричні розряди. Так, американські електричні вугрі генерують розряди напругою до 600 В, африканські електричні соми – близько 350 В. Напруга великих морських скатів порівняно невисока, проте оскільки морська вода є гарним провідником, то сила струму в такому середовищі може сягати іноді 60 А. Причиною виникнення такого сильного розряду є наявність у згадуваних організмів специфічних електричних органів. Це парні видозмінені м'язи. У різних видів риб вони сильно

відрізняються розташуванням, формою і внутрішньою будовою. Маса їх може досягати від 1/6 до 1/4 всієї маси тіла. Кожен електричний орган складається з численних зібраних в стовпчики електричних пластинок – видозмінених м'язових або нервових клітин – електроцитів. Кожна така клітина з однієї сторони з'єднана з нервовим каналом, а з іншої – з іонним каналом. Завдяки цьому клітина виявляється зарядженою лише однією частиною. Пластинки електроцитів впорядковані за своїми полюсами: синапси з одного боку, а поверхні з численними іонними каналами - з іншого. Виходить батарея з'єднаних клітин з упорядкованою полюсністю, тому їх струми додаються. В результаті при проходженні нервового сигналу електричний орган видає розряд певної величини, яка визначається видоспецифічними властивостями і безпосередніми життєвими завданнями власника батареї [2].

Цікавим фактом також є те, що електричні розряди, які виробляють вже згадані нами тварини, зовсім не діють на них самих. Однозначної відповіді на це питання поки не знайдено, але є кілька гіпотез. По-перше, життєво важливі органи таких тварин зазвичай зміщені в одну частину тіла, де ізолюються додатковими шарами жирової тканини, що погано проводить струм. По-друге, весь створений струм повністю витрачається на знищення жертви [3].

Але на виробленні електричних розрядів унікальні властивості водних жителів не закінчуються. Риби не гірше, а часом і краще найчутливіших приладів реєструють електричне поле і помічають найменшу зміну його напруженості. За допомогою електричних сигналів риби можуть навіть особливим чином "перемовлятися". Риби - суперники визначають силу свого супротивника за величиною випромінюваних ними сигналів. Скати можуть виявляти крабів за їх електричними полями, а соми здатні відчувати навіть електрополя, створювані черв'яками [3].

### **Висновки**

Вивчення електричних імпульсів у тілах живих істот є важливим завданням. За відкриття у цій сфері було присуджено сім Нобелівських премій. Наука, що вивчає ці електричні явища, дістала назву електрофізіології. На її працях побудовані значні підрозділи різноманітних галузей науки і техніки.

Електрофізіологічні дослідження широко використовуються в медицині. Новітні методи, які фіксують потенціали тканин, дозволяють діагностувати або попередити різноманітні патології. Відомо також, що загальний наркоз, втрату свідомості і больової чутливості можна викликати, пропускаючи через мозок людини

імпульси змінного струму. Цей спосіб знеболення під час операцій широко використовується за кордоном.

Сьогодні значна частка фармакологічних досліджень побудована на фундаментальних відкриттях електрофізіології, які застосовуються для скринінгу нейролептичних та знеболюючих препаратів, що блокують певні мембранні функції. Значні перспективи «жива електрика» має в енергетичній галузі, тому що добування дешевої, екологічно чистої енергії – це, мабуть, одна з основних цілей людства на найближчі роки.

#### **Перелік посилань**

- [1] Дмитрієва Н. В. Системна електрофізіологія / Н.В. Дмитрієва. – М.: Сайнс-Пресс, 2008. – 256 с.
- [2] Костюк П.Г. Біофізика / П.Г. Костюк, В.Л. Зима, І. С. Магура, М.С. Мірошніченко, М.Ф. Шуба. – К.: ВПЦ КНУ, 2008. — 567 с
- [3] Allaby M. A. Dictionary of Zoology (Oxford Quick Reference). 4th Edition/ M. A. Allaby. – Oxford, 2014. – 704 p.
- [4] Jensen M.O. Principles of conduction and hydrophobic gating in K<sup>+</sup> channels / M.O. Jensen, D.W. Borhani, D.E. Shaw. - Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. – 126 p.