

УПРАВЛІННЯ ОСВІТИ І НАУКИ  
ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСНОЇ ДЕРЖАВНОЇ АДМІНІСТРАЦІЇ  
КОМУНАЛЬНИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ЧЕРКАСЬКИЙ ОБЛАСНИЙ ІНСТИТУТ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ  
ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСНОЇ РАДИ»

# **ТАЄМНИЦІ ПРИРОДИ: ЖИВА ЕЛЕКТРИКА**

**STEM-освіта на уроках біології  
Навчально-методичний посібник**

**Черкаси 2021**

УДК 373.5.016:57

Рекомендовано до друку вченою радою КНЗ «ЧОПОПП Черкаської обласної ради»

Протокол №5 від 29 грудня 2020 року

**Автор-укладач:**

*Даниленко Л. І.*, методист лабораторії природничо-математичних дисциплін комунального навчального закладу «Черкаський обласний інститут післядипломної освіти педагогічних працівників Черкаської обласної ради»

**Рецензенти:**

*Качкар Є.В.*, доцент кафедри професійного розвитку педагогів комунального навчального закладу «Черкаський обласний інститут післядипломної освіти педагогічних працівників Черкаської обласної ради», доцент, кандидат технічних наук;

*Носаєва І. П.*, учитель біології Червонослобідського закладу загальної освіти I-III ступенів №1 Червонослобідської сільської ради Черкаської області, заслужений учитель України.

Д 16 Даниленко Л. І. Таємниці природи: жива електрика (STEM-освіта на уроках біології) (навчально-методичний посібник) /Л. І. Даниленко. Черкаси: КНЗ «ЧОПОПП Черкаської обласної ради», 2020. – 76 с.

*Навчально-методичний посібник містить теоретичний матеріал, компетентнісно орієнтовані завдання та пізнавальні й творчі задачі прикладного характеру, спрямовані на розвиток в учнів технічного та критичного мислення.*

*Мета даного посібника: допомогти вчителю біології організувати освітній процес з використанням навчальних технологій STEM-освіти.*

*Для вчителів біології закладів загальної середньої освіти та учнів, які виявляють зацікавленість до біології, мають підвищений інтерес до більш глибокого вивчення й розуміння природних об'єктів, процесів і явищ.*

© КНЗ «ЧОПОПП Черкаської обласної ради», 2020.

## ЗМІСТ

<b>Передмова</b>	.....	4
<b>Розділ 1.</b>	Історія відкриття живої електрики.....	6
<b>Розділ 2.</b>	Електричні явища в клітині. Поняття про нервовий імпульс та механізми його передачі.....	23
<b>Розділ 3.</b>	Електрика у рослинах.....	28
<b>Розділ 4.</b>	Електрика і ріст рослин.....	33
<b>Розділ 5.</b>	Електричні органи і електрорецептори. Генерація електричних розрядів.....	37
<b>Розділ 6.</b>	Поведінкові реакції електричних риб і скатів.....	42
<b>Розділ 7.</b>	Біохімія електрики.....	45
<b>Розділ 8.</b>	Як нерви «розмовляють» між собою.....	49
<b>Розділ 9.</b>	Використання змінного електричного поля високої частоти в медицині.....	53
<b>Розділ 10.</b>	Пізнавальні й творчі задачі та компетентнісно орієнтовані завдання.....	56
<b>Список використаних джерел.....</b>		75

## Передмова

У Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти), схваленої Кабінетом Міністрів України 05.09 2020 р., зазначено, що основною метою розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) є комплексне поширення інноваційних методик викладання та об'єднання зусиль учасників освітнього процесу і соціальних партнерів у формуванні необхідних компетентностей здобувачів освіти, які дадуть можливість запропонувати розв'язання проблем суспільства, поєднавши природничі науки, технології, інженерію та математику, а основними завданнями природничо-математичної освіти на сьогодні є всебічний розвиток особистості шляхом виявлення її нахилів і здібностей; оволодіння засобами пізнавальної та практичної діяльності; виховання особистості, яка прагне до здобуття освіти упродовж життя, формування вмінь практичного і творчого застосування здобутих знань.

Впровадження природничо-математичної освіти (STEM-освіти) здійснюватиметься з урахуванням таких принципів: особистісний підхід, спрямований на врахування вікових, індивідуальних особливостей здобувачів освіти, їх інтересів та здібностей, особливих освітніх потреб; постійне оновлення змісту освіти з урахуванням досягнень науки, розвитку технологій та вимог ринку праці; наступність – формування необхідних компетентностей на всіх складниках та рівнях освіти; продуктивна мотивація здобувачів освіти до впровадження науково-дослідницької та проектної діяльності, винахідництва; патріотизм і громадянська спрямованість.

Варто також зазначити, що у Критеріях оцінювання навчальних досягнень учнів у системі загальної середньої освіти сформовані компетентності визначаються «як загальна здатність, що базується на знаннях, досвіді та цінностях особистості», набутих завдяки навчанню.

До переліку ключових компетентностей, формування яких визначено результатом навчання біології учнів закладів загальної середньої освіти, входять соціальна і громадянська компетентності. Орієнтиром у їх формуванні є наскрізна змістова лінія «Громадянська відповідальність», реалізація якої «сприятиме формуванню діяльного члена громади й суспільства, який розуміє принципи та механізми функціонування суспільства, є вільною особистістю, яка визнає загальнолюдські й національні цінності та керується морально-етичними критеріями й почуттям громадянської відповідальності у власній поведінці» [11, с.20]. Саме ця наскрізна змістова лінія володіє потенційними можливостями у формуванні особистості нової формації. Вчителю біології у вихованні громадянської відповідальності учнів може стати у нагоді історико-біографічний матеріал про видатних зарубіжних і вітчизняних учених, їхній життєвий шлях, наукова діяльність та наукові відкриття в різні періоди розвитку суспільства. У свій час славетний американський учений Ервін Чаргафф, австрієць за національністю, висловив такі думки, що актуальні і нині: «...я розділяю учених на два основних типи: одні – це більш рідкісний тип – намагаються зрозуміти навколишній світ, пізнати природу; другі, яких значно більше, хочуть пояснити світ. Перші шукають істину, другі прагнуть до

закінченої, стрункої та цілісної картини світу... А тепер доведеться ввести ще одну підгрупу, може найбільш впливову в біології, - це ті, що намагаються перекроїти природу... саме спроба перетворити чи перехитрити природу призведе до її загибелі».

Не викликає заперечень те, що сучасні біологічні, технічні та інженерні знання й досягнення є результатом багатовікової праці учених, винахідників, інженерів минулих століть, відомості про життя і діяльність яких представляє без сумніву значний інтерес і у наш час.

У запропонованому навчально-методичному посібнику вміщено цікавий матеріал щодо відкриття ученими-біологами й фізиками електрики у природі та живих організмах. Наукові відкриття та винаходи таких учених як Луїджі Гальвані, Алессандро Волта, Майкла Фарадея, Генріха Герца, Томаса Алви Едісона, Василя Юрійовича Чаговця, Алана Ллойда Ходжкіна, Ендрю Філдінга Хакслі ввійшли у світову скарбницю людських знань.

## Розділ 1. Історія відкриття живої електрики

Термін «електрика» ввійшов у науку значно раніше, ніж були винайдені електричні лампочки, праски, холодильники. Походить цей термін від грецького слова «електрон», що означає «сонячний камінь». Так стародавні греки називали бурштин – скам'янілу смолу хвойних дерев, які росли на Землі багато тисяч років тому. Давньогрецькі учені помітили, що бурштинове намисто, натерте хутром чи вовною, притягує до себе легкі ворсинки, пух та інші тіла. Це явище назвали електризацією. Тіло, яке після натирання притягує до себе інші тіла, називають наелектризованим, або кажуть, що йому надано електричного заряду.

Заряджені тіла взаємодіють. Різнойменно заряджені тіла притягуються, а однойменно заряджені – відштовхуються. Позитивні заряди позначають символом «+», негативні заряди символом «-». Навколо зарядженого тіла існує електричне поле. Ми його не бачимо, але заряджені тіла взаємодіють саме завдяки електричному полю. Воно виконує роботу з притягнення різнойменно заряджених тіл і відштовхування однойменно заряджених тіл.

Коли учені дослідили будову атома, виявилось, що найменші частинки, які рухаються навколо ядра, також мають електричний заряд. Тому ці частинки назвали електронами. В атомі ядро й електрони заряджені різнойменно. Ядро атома заряджене позитивно, а електрони – негативно. Заряд ядра дорівнює сумарному зарядові електронів, тому загалом атом не має електричного заряду, тобто він нейтральний. А це означає, що тіла довкола нас нейтральні, бо вони складаються з атомів чи молекул, які мають однакову кількість позитивних і негативних зарядів.

А як виникають заряди на тілах? Коли, наприклад, бурштин, скло чи пластмасу потерти об шовк або хутро, то під час тертя електрони деяких атомів від одного тіла відриваються й переміщуються на інше тіло. Унаслідок цього тіла заряджаються: одні позитивно, інші – негативно. Таким чином, коли ми розчісуємося, електрони волосин перерозподіляються. У результаті волосся набуває одного виду заряду, а гребінець – іншого.

Електрика відіграє невидиму, але життєво важливу роль в існуванні багатьох організмів, включаючи і людину. Дивно, але електрика ввійшла у наше життя завдяки тваринам. Першими виявленими людиною біоелектричними потенціалами були розряди електричних риб: ці великі пласкі клітини їх електричних органів є вельми цінним об'єктом для вивчення природи біопотенціалів. Електричного сома *Malapterurus* зображали на гробницях в давньому Єгипті, у римлян зустрічаються згадки про електричного ската *Torpedo*. Живі джерела електрики у свою лікувальну практику вперше ввів відомий стародавній римський філософ, лікар, фармацевт та природознавець, класик античної медицини грек за походженням Клавдій Гален. Син багатого архітектора, Гален отримав разом з добротною освітою і значний спадок, що дозволило йому мандрувати протягом декількох років берегами Середземного моря. Одного разу в одному із невеликих селищ Гален побачив дивну картину: двоє місцевих мешканців йшли йому назустріч із

прив'язаними до голови скатами. Цей «знеболюючий засіб» згодом знайшов застосування при лікуванні ран гладіаторів у Римі, до якого Гален звернувся після закінчення подорожі. Своєрідні фізіологічні процедури виявились настільки дієвими, що навіть імператор Марк Антоній, який страждав болями у спині, ризикнув скористатися незвичним способом лікування. Позбавившись від виснажливої недуги, імператор призначив Клавдія Галена особистим лікарем.



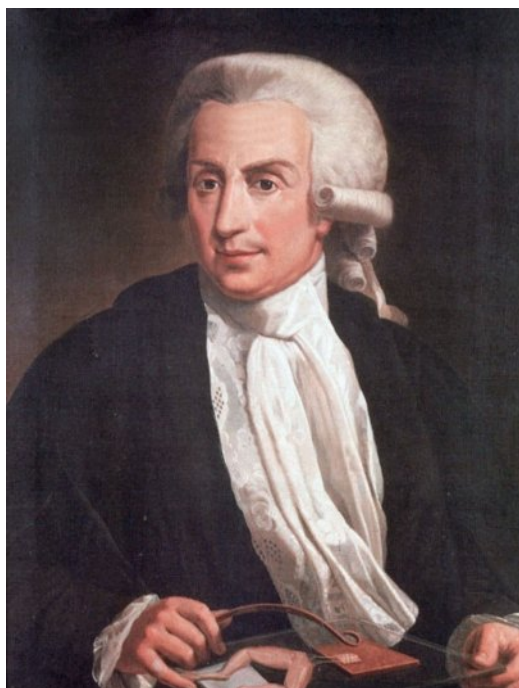
**Гален Клавдій**

(129 або 131 – біля 200 або 2017 рр.)

«Електричну терапію» за допомогою електричних риб широко використовували і європейські лікарі XVIII століття.

Уперше європейці зіткнулися зі страхітливими живими електростанціями у джунглях Південної Америки. Загін шукачів пригод, які проникли у верхів'я Амазонки, наткнувся на безліч мілких струмків. Але ледве один з його учасників вступив ногою у теплу воду струмочка, як упав без свідомості і знаходився у такому стані два дні. А причиною такого стану були електричні вугрі, які мешкали у цих широтах. Амазонські вугрі, які досягають трьох метрів у довжину, здатні генерувати електрику напругою більш як 550 В. Електричний удар у прісній воді приглушує здобич, що зазвичай складається із риб і жаб, але може також убити людину і навіть коня, якщо вони у момент розряду знаходяться поблизу.

Отже, великий електричний вугор Electrophorus був привезений до Європи дослідниками Південної Америки і зразу ж виникли перші припущення про природу його удару. В кінці XVIII ст. деякі природодослідники припускали, що удар електричного вугра схожий з блискавкою або електростатичним розрядом лейденської банки. У 1773 році Дж. Уолш з'ясував, що електричний удар проводиться через метал і не проходить через скло і повітря. Фізик з Кембріджа Кавендіш створив модель Torpedo, на основі якої встановив відмінність між поняттями різниці електричних потенціалів і кількістю електрики. Фарадей вимірював струм розряду Electrophorus за допомогою гальванометра. Він пророчо відмітив, що, якби вдалося зрозуміти природу електричного розряду риб, можна було б «перетворювати електричну силу на нервову».



**Луїджі Гальвані**  
(1737-1798)

Невідомо, коли б людство серйозно взялось би за електрику, якби не дивний випадок, який стався із дружиною болонського професора Луїджі Гальвані. Не є таємницею, що італійці славляться широтою смакових пристрастей, а саме: вони любляють посмакувати жаб'ячими лапками. Того разу день був прохолодний, дув сильний вітер і коли сеньйора зайшла до м'ясної крамниці, то перед нею постало страшне видовисько. Лапки мертвих жаб, немов би живі, здригались, коли торкались залізних перил при сильному пориві вітру. Сеньйора так набридла чоловіку своїми розповідями про зв'язок м'ясника з нечистою силою, що професор вирішив особисто з'ясувати, що ж відбувається насправді.

Це був найщасливіший випадок, який разом перевернув життя італійського анатома і фізіолога. Принісши додому жаб'ячі лапки, Гальвані упевнився у правдивості слів дружини: вони дійсно здригались, коли торкались залізних предметів. У 1786 році Луїджі Гальвані вирішив вивчити дію атмосферної електрики на м'язи жаби і вважав, що відкрив «тваринну електрику». На той час професору було всього 34 роки. Наступні 25 років він витратив на те, щоб знайти розумне пояснення цьому дивному явищу. Результатом його багаторічної праці стала книга «Трактати про силу електрики при м'язовому русі», яка стала справжнім бестселером і сколихнула розум багатьох дослідників. Уперше заговорили про те, що електрика є в кожному із нас і що саме нерви є своєрідними «електропроводами». Гальвані здавалось, що м'язи накопичують в собі електрику, а при скороченні виливають її. Ця гіпотеза потребувала подальших досліджень. Але політичні події, викликані приходом до влади Наполеона Бонапарта, перешкодили професору закінчити експерименти. У силу свого вільнодумства Гальвані був вигнаний з університету і через рік після цих



трагічних подій помер у віці шістдесят одного року [15, с.18].



**Алессандро Вольта  
(1745-1827)**

Але все-таки долі було завгодно, щоб праці Гальвані знайшли своє продовження. Співвітчизник Гальвані Алессандро Вольта, прочитавши його книгу, дійшов думки про те, що в основі живої електрики лежать хімічні процеси. Істинну причину спостережуваного ефекту досліду Гальвані встановив Алессандро Вольта, який довів, що струм виникає завдяки контакту двох провідників із різних металів і перевіряв досліди Гальвані на собі. Вольта брав дві різні металеві монети, одну з них клав на язик, а іншу – під язик, з'єднував їх металевою дротиною і одразу ж відчував у роті кисло-солоний присмак електричного струму.

У 1799 році італійський фізик Алессандро Вольта винайшов перше у світі найпростіше хімічне джерело електричного струму і назвав його на честь свого співвітчизника Л. Гальвані – гальванічним елементом.

У 1800 році Вольта для отримання електричного струму склав один на один кілька дисків із міді і цинку, чергуючи їх між собою і відділивши один від одного сукном, просоченим розсолем. Таким чином було відкрито батарею гальванічних елементів – «вольтів стовп».



### **Фарадей Майкл (1791-1867)**

Видатний англійський фізик і хімік, засновник вчення про електромагнетизм. Відкрив явище електромагнітної індукції, закони електролізу, заклав основи теоретичної електротехніки.

Майкл Фарадей став знаменитим ще за життя, на багато десятиліть вперед передбачивши розвиток наукової думки. Так, зокрема Фарадей, йдучи в науці своїм особливим шляхом, у повному протиріччі з панівним на той час науковим світоглядом, нерідко знаходив закономірності і бачив взаємні співвідношення там, де ніхто до нього їх не визнавав і не міг побачити.

На початку 1813 року молодий майбутній учений приступив до роботи у Британському королівському інституті. З цього часу і розпочався творчий шлях ученого-самоучки, який продовжувався більше як півстоліття у стінах вище означеного закладу. Саме тут Фарадей сформулював основний закон про електромагнітну індукцію, відкрив закони електролізу і дискретність електричного заряду, першим вивчив властивості діелектриків і форми газового розряду, відкрив пара- і діамагнетизм і магнітну анізотропію, виявив обертання площини поляризації у магнітному полі. Крім того, він ввів у науку одне з основних фізичних понять – поняття поля, винайшов вольтметр, електродвигун, трансформатор.

З 1816 по 1821 рр. Фарадей в основному займався хімією і зробив у цій галузі декілька важливих відкриттів, за що був обраний членом Королівського товариства.

У 1825 році Фарадей був призначений директором лабораторії Королівського інституту, а згодом, через два роки, отримав професорську кафедру.

Діючи чисто емпірично, 17 жовтня 1831 року Майкл Фарадей виявив явище електромагнітної індукції: виникнення у ланцюгу електричного струму при зміні зовнішнього магнітного поля. Успіх приніс йому дослід, який зараз здається нам тривіальним: навколо металічного кільця обвивалось два окремих витка дроту. По одному з них, приєднаному до батареї, пропускався електричний струм. Метою ученого було в'яснити, чи не виникне струм у «мертвому» дроті під впливом «живого». З прикладної точки зору, була отримана модель першої динамо-машини, котра через століття повністю змінить образ Землі.

Але цей бік питання абсолютно його не цікавив. Протягом наступних 25 років він цілеспрямовано вивчав лише дві речі: спосіб, яким чином електричні і магнітні сили передаються у просторі, і зв'язок між цими силами і матерією.

У електромагнетизмі Фарадей зробив три визначних відкриття, причому будь-якого з них окремо було б достатньо, щоб його ім'я назавжди залишилось у науці. Перше, про яке ми вже згадували, – це відкриття електромагнітної індукції. Друге – це відкриття діамагнетизму, тобто властивостей всіх без виключення речовин у природі набувати у зовнішньому магнітному полі компоненту намагніченості проти напрямку поля. До речі, слова «діамагнетик», «парамагнетик», а також всі можливі похідні від них були введені Фарадеєм, котрий взагалі приділяв велику увагу адекватній термінології. Ним були запропоновані терміни «анод», «катод», «електрод», «електроліт», «електромагнетизм», «позитивна і негативна електрика». І насамкінець, третє відкриття – обертання плоскості поляризації світла у магнітному полі.

Відкриття ученого завоювали визнання у всьому науковому світі, його іменем були згодом названі закони, явища, одиниці фізичних величин і т. п. фарада, фарадей, число Фарадея, циліндр Фарадея та ін.).

До 1867 року його наукові відкриття визнали 97 академій наук, він також був володарем цілої колекції наукових титулів. Проте він не вважав за потрібне отримати хоча б одне наукове звання. Вірний собі Фарадей відмовився і від дворянського титулу, промовляючи при цьому наступну фразу: «Дякую. Але я хочу називатися просто: Майкл Фарадей».

Вже у ХХ ст. в Лондоні був знайдений конверт, який містив передбачення Фарадея про існування електромагнітних хвиль. Зокрема, він писав: «...я хочу, передаючи цей лист на зберігання у Королівське товариство, закріпити за собою відкриття певною датою і, таким чином, мати право, на випадок експериментального підтвердження, оголосити цю дату датою мого відкриття. На цей час, наскільки мені відомо, ніхто з учених, крім мене, не має подібних поглядів». Підтвердження цієї гіпотези було отримано Генріхом Герцем через 55 років після смерті великого англійського вченого [7].



**Генріх Герц  
(1857-1894)**

Генріх Герц народився у м. Гамбурзі 22 лютого 1857 року. У рідному місті він здобув середню освіту. З жовтня 1878 року Герц почав слухати лекції Германа фон Гельмгольца і Густава Роберта Кірхгофа, а через два роки Герц написав першу наукову працю і став асистентом у Гельмгольца.

У 1879 році одна з європейських наукових академій оголосила про присудження премії тому, хто експериментально доведе існування електромагнітних хвиль.

1880 року Генріх Герц отримав ступінь доктора філософії у Берлінському університеті, і залишився на післядокторське навчання під керівництвом Гельмгольца. У 1883 році він займає посаду лектора теоретичної фізики у Кільському університеті. Там він старанно вивчав електромагнітну теорію Максвелла.

У 1885 році Генріх Герц став повним професором в Університеті Карлсруе, де він і зробив наукове відкриття про існування електромагнітних хвиль.

За пропозицією Гельмгольца, у 1886 році Герц розпочав свої знамениті дослідження.

Герц ніколи не був суто ученим-теоретиком. Теорія і дослідження гармонійно поєднувались в його роботі, «коли я працюю лише з книжками, то мені здається, що я – абсолютно некорисний член суспільства», говорив Герц. По 20 годин просиджував він за лабораторним столом, лишаючись, як говорив, «з природою на самоті».

Герцу було відомо, що майже 60 років тому (в 1826 р.) французький фізик Фелікс Савар, розряджаючи лейденську банку через спіральний розрядник, намагався намагнітити сталеву голку, вміщену всередині котушки.

Знаючи заздалегідь, на якій з обкладинок був розміщений позитивний і на якій – негативний заряд, Савар мав намір на певному кінці голки отримати північний магнітний полюс.

Савар багато разів старанно повторював свою спробу. Однак результати часто не відповідали його передбаченню. Савар ніяк не міг з'ясувати причини такої розбіжності. І лише через 35 років після цього фізик Беренд Феддерсен, зацікавившись спробами Савара, зміг пояснити цю розбіжність.

Феддерсен з'ясував, що розряд лейденської банки має коливальний характер. Це означає, що розрядний струм іде спочатку від зовнішньої обкладинки банки до внутрішньої, а потім назад, причому дуже швидко й багато разів. Відбуваються коливання великої частоти. І від того, на якій стадії коливання припиняються, залежить результат намагнічування голки.

На сконструйованій Феддерсеном установці, йому у 1862 році вдалося довести коливальний характер розряду лейденської банки. Якби розряд складався із однієї іскри, то в дзеркалах, що обертаються, можна було б спостерігати безперервну стрічку. Фотографія ж довела, що розряд складається із багатьох серій іскор. Але що таке лейденська банка? Це конденсатор, тобто збирач, згущувач електрики. Отже, коло, що складається з конденсатора, приєднаного до індуктивної котушки (спіраль у дослідах Савара), під час пропускання крізь нього струму може створювати електричні коливання – «електричний маятник».

Все це Герц добре знав, так само, як і математичну теорію електричних коливань, опрацьовану знаменитим англійським фізиком Уільямом Томсоном.

І ось у 1886 році Герц узяв два мідні стержні завтовшки 5 мм, на їхні кінці насадив по одній маленькій (діаметром 3 см) і по одній великій (діаметром 30 см) кулі. Ці стержні він укріпив вертикально на одній прямій лінії, розмістивши маленькі кулі на відстані 7 м одна від одної (іскровий проміжок). Цей апарат Герц назвав вібратором, тобто джерелом коливань, або випромінювачем електромагнітних хвиль. Два прямолінійні провідники з'єднувалися із однією обмоткою індукційної котушки, в якій збуджувалася змінна ЕРС. Якщо значення амплітуди ЕРС, прикладеної до вібратора, досягало визначеного значення, то в іскровому проміжку вібратора проскакувала іскра, і в провідниках виникали коливання електричного струму із дуже малим періодом. У проміжку між маленькими кулями проскакували іскри, отримані за допомогою котушки Румкорфа. Від цього в навколишнє середовище випромінювались електромагнітні хвилі. Герц підібрав такі розміри складових свого апарату, що час одного коливання в колі вібратора становив одну шестидесятимільйону частку секунди. При цьому виникали хвилі завдовжки 5 м. Але як «зловити» цю електромагнітну хвилю? Як виявити її існування?

Учитель Герца, великий фізик Гельмгольц, виконав багато цінних досліджень щодо звуку. Ознайомлення з цими працями допомогло Герцу розв'язати й другу частину завдання.

Звук, як і світло, відбивається від поверхні, на яку він потрапляє. Цим пояснюється, наприклад, таке явище, як луна.

Герц знав також, що кілька звукових або світлових хвиль, поширюючись в одному і тому самому напрямку, взаємодіють між собою. Від накладання кількох хвиль можна одержати одну хвилю. Це явище накладання хвиль

називається *інтерференцією*. Якщо у двох хвиль збігаються їх гребні, то внаслідок накладання утвориться ще вища хвиля.

Якщо в одному напрямку поширюються дві хвилі, то одна рухається вперед, а друга, відбита, рухається назад. У цьому разі можуть виникнути особливого роду стоячі хвилі. Такі хвилі легко отримати, якщо довгу мотузку прикріпити за один кінець, а з другого надіслати поштовх. Хвиля, що виникне на мотузці, збіжить до упору і відіб'ється від нього. Якщо посылати по мотузці такі поштовхи один за одним, то внаслідок взаємодії прямих хвиль, що йдуть до упору, і зустрічних, відбитих, хвиль виникнуть *стоячі хвилі*.

У так званих вузлах взаємодіючі хвилі ніби знищують одна одну. Навпаки, в інших місцях, що називаються *пучностями*, виявляється найбільший результат взаємодії прямої і відбитої хвилі.

Пригадаємо ще одне явище. Якщо взяти два однакові камертони і примусити один з них звучати, то і другий камертон, розміщений поряд, також почне звучати, ніби відгукуючись. Це явище називається *резонансом*.

Виходячи з цього, Герц передбачав, що приймачем – резонатором для електричних променів – може бути шматок дротини, зігнутої по колу діаметром 70 см. В одному місці це дротяне кільце було перерізане для утворення іскрового проміжку.

На відстані 13 м від випромінювача хвиль Герц установив вертикальну металеву стінку для відбивання електромагнітних хвиль. Потім він увімкнув джерело струму і почав досліджувати простір між місцем коливного розряду й металеву стінкою. Чому саме так зробив Герц?

Він хотів виявити електромагнітну хвилю завдовжки 5 м, що утворюється коливним розрядом від великих куль. На взятому проміжку цього цілком можна було досягти.

Крім того, Герц намагався довести, що електромагнітні хвилі, як і звукові, під час відбивання взаємодіють між собою (пряма з відбитою), при цьому виникають *стоячі хвилі з вузлами і пучностями*. І справді, коли Герц переміщував свій резонатор вздовж згаданого напрямку поширення резонатора праворуч і ліворуч іскор не було помітно.

Біля вібратора Герца розміщували резонатор. Це був провідник, зігнутий у вигляді кола або прямокутника, кінці якого також утворювали іскровий проміжок. Спочатку суть дослідів Герца полягала в тому, що він спостерігав дію іскри, що проскакувала у вібраторі, на резонатор. При цьому він помітив, що з появою іскри у вібраторі виникає іскра й у резонаторі.

Спочатку Герц вважав, що спостерігається випадок електромагнітної індукції, коли зі зміною струму у вібраторі виникає струм у резонаторі. Але продовжуючи досліді, учений помітив, що в кімнаті, де він працював, є такі місця, в яких резонатор не реагує на іскру вібратора. Тоді дослідник доходить висновку, що спостережуване явище не можна пояснити електромагнітною індукцією. У кімнаті виникали стоячі електромагнітні хвилі, в одних місцях яких були вузли, а в інших – пучності.

Герц захоплений своїм відкриттям, писав: «Я думаю, що хвильова природа звуку в порожньому просторі демонструється не так чітко, як хвильова природа цього електродинамічного процесу».

Цими чудовими дослідями Герц довів існування стоячих електромагнітних хвиль. У подальшому він довів подібність властивостей світлових променів і «променів електричних» (так спочатку Герц назвав електромагнітні хвилі). Свої досліди над електричними променями він виконував на обладнанні, подібного до того, за допомогою якого демонстрували властивості світлових променів.

У дослідях Герц застосовував відбивні поверхні з металевих стінок. При цьому електричні промені підлягали загальновідомому закону оптики (кут падіння дорівнює куту відбивання) і, відбиваючись, спричиняли в резонаторі іскру. Нарешті, Герц пропускав електричні промені крізь тригранну смоляну призму, і при цьому промені заломлювались. Він помітив, що «електричні промені» легко проходили крізь дерев'яні стіни і двері й узагалі крізь, непровідники електрики (діелектрики). «Електричні промені» проходили і крізь дуже тонкі металеві пластинки.

Досліди Герца було відтворено в багатьох наукових лабораторіях. Таким чином, було підтверджено теорію Джеймса Масквелла. Хвилі, отримані Герцем, виявилися електромагнітними хвилями. Існування електромагнітних хвиль та їхні властивості було теоретично передбачено Масквеллом у 60-ті роки XIX ст. і лише в 1888 році їх було вперше експериментально отримано й досліджено Генріхом Герцем. За допомогою тонких експериментів Герц виявив і дослідив відбивання, заломлення, інтерференцію, дифракцію і поляризацію електромагнітних хвиль. Він довів, що в усіх випадках електромагнітні хвилі поведуться як видиме випромінювання, закономірності якого було на той час добре вивчено. Швидкість електромагнітних хвиль, як виявилось, дорівнює швидкості світла [10, с. 42-44].

Наукові праці видатного ученого відіграли величезну роль у розвитку науки і техніки, сприяючи цим появленню безпроводного телеграфу, радіозв'язку, радіолокації, телебачення.



**Чаговець Василь Юрійович  
(1873-1941)**

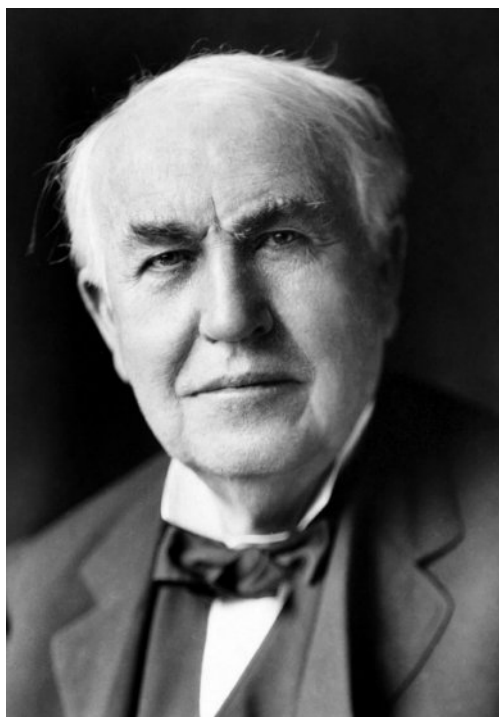
Видатний український учений, учень І.П. Павлова, академік Академії наук УРСР (з 1939 р.), народився на Сумщині. 1897 року закінчив Військово-медичну академію в Петербурзі, після якої служив у піхотному полку лікарем (1897-1900 рр.). З 1903 по 1909 рр. працював в Академії, де захистив дисертацію з теми «Нарис електричних явищ на живих тканинах з погляду найновіших фізико-хімічних теорій».

З 1910 року В. Ю. Чаговець – завідувач кафедри фізіології Київського університету, а 1921 року очолив кафедру 1-го Київського медичного інституту, 1936 року – кафедру 2-го Київського медичного інституту.

Основні наукові праці присвячені проблемам електрофізіології. Учений використовував теорію електролітичної дисоціації для пояснення електричних явищ у живому організмі. Василь Юрійович довів, що демаркаційний струм м'язів є концентраційним струмом, що виникає внаслідок накопичення  $\text{CO}_2$  у пошкодженій ділянці м'яза, теоретично встановив величину електрорухомої сили демаркаційного струму. Ще у 1896 році учений запропонував іонну теорію походження біоелектричних явищ у живій тканині. Створив (1906) конденсаторну теорію подразнення тканин, довів, що подразнювальна дія електричного струму зумовлена конденсаторним накопиченням іонів на напівпроникних мембранах живих тканин. У 1935 році розробив і ввів у практику електрогастрографію – метод реєстрації електричних потенціалів, пов'язаних з моторною і секреторною діяльністю шлунку.

Серед найбільш відомих робіт Василя Юрійовича – дослідження електричного наркозу, пояснення природи цього явища. Учений також сприяв розвитку наукового приладобудування. Один із засновників сучасної електрофізіології [6, с. 682-683].





**Едісон Томас Алва  
(1847- 1931)**

Геніальний американський винахідник і підприємець, організатор першої промислово-дослідницької лабораторії США. Автор понад 1000 винаходів у галузі електротехніки. Удосконалив телеграф, винайшов телефон і фонограф, лампу розжарювання, побудував першу в світі електростанцію суспільного користування.

Томас Едісон проробив понад 5 тисяч різних дослідів у пошуках матеріалу, з якого можна було б виготовити тугоплавку нитку для лампи розжарювання. Усі випробувані ним матеріали при розжарюванні електричним струмом миттєво згорали, але він не втрачав віри у кінцевому успіхові. Коли після чергового експерименту один із співробітників вигукнув: «Знову невдача!», то у відповідь почув: «Це не невдача. Нам вдалось встановити, що цей матеріал не годиться. З'ясувавши, які матеріали нам не підходять, ми знайдемо те, що нам потрібно...». А коли Едісону було 67 років, його лабораторія у Нью-Джерсі згоріла вщент. Було знищено обладнання на 2 мільйона доларів (за цінами того часу), а також записи і результати праці усього його життя. Наступного ранку, обходячи руїни згарища, винахідник сказав своєму сину: «Нещастя принесло нам користь. Згоріли всі наші помилки. Слава Богу, ми можемо почати все заново!».

Самородку-винахіднику було всього 23 роки, коли він облаштував велику електричну майстерню в Нью-Йорку, в якій працювало до трьохсот працівників. Спочатку в ній виробляли телеграфні апарати та інші електричні прилади, але згодом сфера її діяльності значно розширилась. Едісон перетворив майстерню у центр, у якому розроблялось безліч різних винаходів.

Це був один із плідних періодів його життя. Відкриття відбувались одне за одним, і директор американського патентного бюро образно говорив, що дорога в контору привілей не встигала охолоджуватися під кроками цієї молодогої

людини. Як тільки геніальні здібності Едісона отримали визнання, зразу ж знайшлась акціонерна компанія, яка купила у нього не тільки всі вже завершені і оформлені, але й ще незавершені і навіть всі майбутні його винаходи.

У 1876 році Томас Едісон переселився із своєю родиною в Менло-Парк, затишне місце в чотирьох милях від Нью-Йорку. Тут він облаштував свої знамениті майстерню і лабораторію, де було зроблена більша частина його геніальних винаходів. На одні лише прилади для своїх численних дослідів і спостережень Едісон витратив 100 тисяч доларів. Складні станки і механізми у майстерні приводились у рух паровою машиною. Томас зібрав найкращих у США майстрів і механіків, а сам став генератором винаходів, які виходили з майстерні, ніби з конвеєра: лампа розжарювання, електролічильник, кінескоп, кінокамера, електричний стілець, тостер, фонограф, лужний акумулятор. До 1888 році всі винаходи і відкриття вченого були впроваджені у промислове виробництво, а сам Едісон став власником багатьох підприємств, що приносили йому все нові прибутки. У 1915 році його наукові заслуги були відзначені присвоєнням Нобелівської премії. Все це було досягнуто внаслідок титанічної праці ученого. За розповідями співробітників, він працював у середньому по 18 годин на добу, а спав найчастіше прямо сидячи у кріслі. Геніальний винахідник був простою людиною, скромним у побуті, що викликало всезагальну симпатію до нього: «Едісон вище середнього зросту, з темним волоссям, з легкою сивиною; він не носив бороди, і у нього свіже обличчя зовсім молодого людини, що складало значний контраст з його сивиною. Під масивним високим лобом сяють вражаючі очі, які, здається, пронизують вас наскрізь, особливо, коли він задумується. Завдяки його доброзичливості і простоті, у нього багато друзів і знайомих... він гарний сім'янин, ніжний батько і чоловік; його домашні вже звикли до його дещо оригінального стилю життя, коли він по декілька днів не показується додому і пропадає у своїй лабораторії».

Багатство і слава не відклали на ньому помітного відбитку, і всевітньо відомий мільйонер-винахідник залишався для своїх старих друзів все тим же Томом, який не терпів манірності, показних церемоній і званих обідів з хвалебними промовами. Так, на званому обіді у престижному ресторані він міг обмежитися лише чашкою чаю. Але найчастіше він взагалі відмовлявся від запрошень, говорячи, що і «за сто тисяч доларів не згоден просидіти дві години, вислуховуючи славослів'я». Його не приваблювала особиста слава, оскільки він вважав, що «достоїнства людини визначаються його справами, а не тим, що про неї говорять» [7, с. 781].

У кінці 1880-х рр. Едісон переніс свої майстерні в Левелін-Парк, поблизу Нью-Йорка. Облаштовані у Левелін-Парку лабораторії і фізичні кабінети за своїм оснащенням на той час не мали собі рівних. Механічні майстерні були обладнані найдосконалішими машинами і пристроями, за допомогою яких за короткий час можна було виготовити як великі, так і дрібні механізми. Саме тут Томас Едісон розпочав виробництво свого найбільш відомого винаходу електричної лампочки. Цікаво, що американські банкіри відмовились фінансувати цей проект. Тоді Едісон сам зібрав 90% необхідного капіталу і

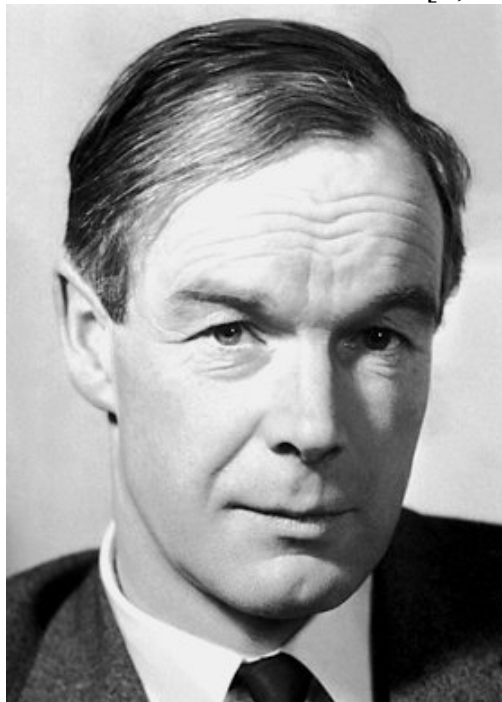
зайнявся виробництвом самостійно. Згодом фабрики, які виробляли лампочки, лягли в основу конгломерату «Дженерел електрик».

Улітку 1889 року Едісон відвідав Паризьку Всесвітню виставку і підкорив серця парижан не менш, ніж представлений ним на суд публіки фонограф, над удосконаленням якого він працював 10 років. Проте у науковому світі «винахідник-самородок» завжди був сам по собі. Його ніколи не визнавав науковий істеблішмент, а він, у свою чергу, не визнавав його. Томас жив непохитною вірою у кожний свій винахід, стверджуючи, що «проблема інших винахідників у тому, що після кількох поразок вони кидають розпочате. Я ж ніколи не здаюсь, поки не досягну бажаного» [7, с. 782].

Кожну нову ідею він спочатку оголошував на прес-конференції і лише після цього він йшов до лабораторії, щоб експериментально підтвердити свою здогадку – це був метод підганяти самого себе, а заодно і отримати необхідну фінансову підтримку для досліджень.

Великий винахідник прожив 84 роки і помер 18 жовтня 1931 року в Уест-Оринджі.

Як це зазвичай і буває, лише після смерті генія нащадки визначились з тим місцем, яке він по праву зайняв у світовій історії: Томас Едісон – один із великих умів, які з'являючись у відомі періоди часу серед людства, відмічають собою цілі нові ери у розвитку відомої галузі науки або техніки. До нього не можна в повній мірі застосовувати те мірило, яким зазвичай користуються при оцінці багатьох видатних людей. За своєю особливою розумовою силою і майже надлюдською обдарованістю люди, подібні йому стоять особняком, представляючи собою вражаючі феномени у розвитку людського мозку... якщо вірно, що геній – невичерпна здатність до праці, до самих дрібниць, то Едісон за своєю діяльністю підходить до цього визначення» [7, с. 782].



**Алан Ллойд Ходжкін (Годжкін)  
(1914-1998 рр.)**

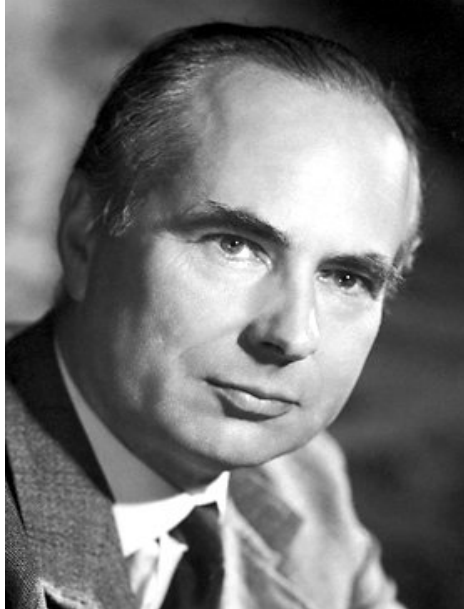
Народився в Банбері, Англії, 5 лютого 1914 року. Навчався в Малверні з 1923 по 1927 рр., потім в Холті (1927-1932 рр.) та Трініті-коледжі (1932-1936 рр.). Його дід, Томас Ходжкін, займався історією, тому з самого початку Алан коливався між історією і наукою. З раннього віку йому були цікаві природничі науки, зокрема орнітологія, тому його вибір зупинився на вивченні хімії та біології. Коли Алан вчився в Кембриджі, його вчитель Карл Пантін, радив йому вивчати математику і фізику. У цей же час Алана зацікавила фізіологія, особливо діяльність нервових клітин. Ще в студентські роки він почав серйозні експерименти та продовжував їх упродовж декількох років. Під час навчання в Трініті-коледжі Ходжкін провів попередні дослідження щодо електричних властивостей нервів.

Арчибальд Хілл, який рецензував його дисертацію, надіслав копію Герберту Гассеру і той запропонував Ходжкіну роботу в своїй лабораторії при Рокфеллерівському університеті в Нью-Йорку. У цей період (1937-1938 рр.) майбутній видатний фізіолог провів кілька тижнів із Стюартом Коулом у Вудс-Холі, де навчився препарувати аксони кальмарів. Він повернувся до Кембриджу у 1938 році і далі почав співпрацю з Ендрю Хакслі, який тоді навчався на останньому курсі. Вони використовували методи, які Алан розробив під час роботи в США. Завершити дослідження їм завадила Друга світова війна, під час якої Ходжкін працював переважно на радіолокаційних системах Військово-Повітряних Сил. Найбільше його цікавила розробка системи виявлення нічних винищувачів. Після війни Ходжкін повернувся до Кембриджу, де працював викладачем у фізіологічній лабораторії. Кілька місяців по тому повернувся і Хакслі й вони продовжили розпочату до війни роботу. Річард Адріан надав їм велику підтримку, полегшивши навчальне навантаження і домовившись з Фондом Рокфеллера про щедрий грант для підтримки роботи; пізніше допомога була отримана і від інших організацій, зокрема від Фонду Нуффілда і Королівського товариства. Більшість експериментів на нервових волокнах доводилося проводити в Плімутському університеті і з 1947 року Ходжкін зазвичай проводив там 2-3 місяці на рік в лабораторії Морської біологічної асоціації.

У 1958-1960 рр. Алан Ходжкін був членом ради Королівського товариства, у 1959-1963 рр. – Ради медичних досліджень, у 1961-1967 рр. – міністром закордонних справ фізіологічного товариства. Він також був президентом Морської біологічної асоціації з 1966 року і президентом Королівського товариства з грудня 1970 року. У 1971 році був призначений ректором Лестерського університету.

Крім Нобелівської премії Алан Ллойд Ходжкін отримав Королівську медаль (1958) і медаль Лондонського королівського товариства (1965). Володар численних почесних ступенів. Він був членом Королівського товариства і Королівської академії наук Данії, іноземним членом Американської академії наук і мистецтв, Національної академії наук Індії, Академії наук СРСР і Королівської академії Ірландії.

Отже, Алан Ллойд Ходжкін зробив відкриття, що стосуються іонних механізмів, які беруть участь в збудженні та гальмуванні в периферичних і центральних ділянках мембрани нервової клітини. Іонна теорія нервового імпульсу Ходжкіна - Хакслі - Екклза (теорія калій-натрієвого насосу) містить принципи, що можуть бути застосовані також і до імпульсів у м'язах, включаючи і серцевий м'яз, що має клінічне значення [20].



**Ендрю Філдінг Хакслі (Гакслі)  
(1917-2012)**

Видатний англійський нейрофізіолог і біофізик, лауреат Нобелівської премії з фізіології і медицини у 1963 році (спільно з Аланом Ходжкіном і Джоном Екклзом) за відкриття, що стосуються йонних механізмів збудження і гальмування у периферичних і центральних ділянках нервових клітин. Ці відкриття дали можливість сформулювати сучасну теорію виникнення збудження, відому як теорія калій-натрієвого насосу.

Народився учений у лондонському районі Хемпстид у сім'ї відомого письменника Леонарда Хакслі. Ендрю Хакслі з дитинства цікавився природознавством і технікою. Коли йому було 12 років, батьки подарували йому і старшому брату токарний станок з ножним приводом, на якому у зрілі роки він майстрував різні необхідні йому для досліджень деталі. Навчався у коледжі Лондонського університету і у Вестмістерській школі. У той же час проявляв інтерес до фізики, і тому вступив до Трініті-коледжу в Кембриджі у 1935 році. Проте, у 1937 році перейшов до медичної програми і двома роками пізніше став працювати з Аланом Ходжкіним у морській біологічній лабораторії у Плімуті (досліджують передачу електричних імпульсів по аксонам). Вони перервали дослідження під час Другої світової війни, Хакслі проводить експерименти для протиповітряної оборони і військово-морського міністерства.

Після закінчення війни Ендрю Хакслі і Алан Ходжкін повернулись до досліджень аксона кальмара. Вони розробили метод вимірювання йонних

струмів, які утворюють нервовий імпульс, і сформулювали гіпотезу про існування йонних каналів, які відкриваються і закриваються залежно від мембранного потенціалу. Ця гіпотеза була підтверджена через кілька десятиліть. Для кількісного опису потенціалу дії і йонних струмів вони запропонували систему диференціальних рівнянь – модель Ходжкіна-Хакслі. Модель прекрасно описує основні експериментальні факти, у тому числі класичний закон «все або нічого», тобто незалежність форми і величини нервового імпульсу від величини збуджуючого стимулу, якщо він перевершує пороговий рівень.

Ендрю Хакслі також вдалось теоретично розрахувати швидкість поширення імпульсу по нерву, яка з 10% точністю співпала із тією, за якою спостерігали. Ці результати, опубліковані у серії статей у 1952 році, поклали початок сучасній електрофізіології збуджуючих тканин і теорії автохвиль – нової галузі теоретичної біофізики.

У 1954 році результати їх досліджень були опубліковані. З 1952 по 1960 рр. Хакслі був керівником досліджень у Трініті-коледжі. З 1951 по 1959 рр. працював помічником директора з дослідницької роботи і читав лекції з експериментальної біофізики у період з 1959 по 1960 рік. З 1969 року – професор Королівського дослідницького товариства у Лондонському університеті, з 1983 року – заслужений професор. Ендрю Хакслі нагороджений медаллю Коплі (1973), а також був іноземним членом Національної академії наук США (1979).

У 1963 році Ендрю Хакслі і Алана Ходжкіна нагородили Нобелівською премією з фізіології і медицини разом з австралійським ученим Джоном Екклзом, який досліджував синаптичну передачу, «за відкриття, що стосувались йонних механізмів збудження і гальмування у периферичних і центральних ділянках нервових клітин» [19].

## **Розділ 2. Електричні явища в клітині.**

### **Поняття про нервовий імпульс та механізми його передачі**

Нервові клітини, або нейрони, сприймають, проводять і передають електричні сигнали. Значення цих нервових імпульсів різне і залежить від ролі, яку відіграє ця клітина у функціонуванні нервової системи в цілому. У мотонейронах (рухових нейронах) сигнали служать командами для скорочення певних м'язів. У сенсорних (чутливих) нейронах сигнали передають інформацію про подразники (світлові, механічні, хімічні тощо), які впливають на ту чи іншу ділянку тіла. Сигнали інтернейронів (вставних нейронів) являють собою результати сумісної переробки сенсорної інформації з кількох різних джерел, які обумовлюють формування адекватних рухових команд. Природа усіх цих сигналів однакова й полягає у зміні електричного потенціалу на плазматичній мембрані нейрона. Передача сигналів ґрунтується на тому, що електричне збудження, яке виникає в одній ділянці клітини, поширюється на інші ділянки. Якщо немає додаткового підсилення, ці збудження затухають у міру віддалення від їхніх джерел. На коротких відстанях затухання незначне, тому нейрони проводять сигнали пасивно, без посилення. Проте для передачі на значну відстань такого пасивного поширення сигналу недостатньо. Тому в нейронів з довгими відростками є активний сигнальний механізм. Електричний стимул, сила якого перевищує певну порогову величину, зумовлює вибух електричної активності, яка поширюється з великою швидкістю вздовж плазматичної мембрани нейрона. Цю біжучу хвилю збудження називають потенціалом дії або нервовим імпульсом. Нервовий імпульс – це хвиля збудження, що виникає як відповідь рецепторів на подразнювальний вплив будь-яких факторів і короткочасно з великою швидкістю поширюється по нервовому волокну до нервових центрів, у ЦНС (центральної нервовій системі) й від неї до органів, що виконують певні функції (скелетні м'язи, судини, залози тощо). В основі нервового імпульсу лежать фізіологічні й фізико-хімічні зміни в нервовій тканині. Причиною поширення нервового імпульсу є утворення різниці потенціалів між збудженими й незбудженими ділянками цієї тканини. Величина нервового імпульсу визначається амплітудою потенціалу дії. Швидкість нервового імпульсу в різних нервових елементах коливається від 0,5 м/с до 100-120 м/с, а тривалість - від кількох десятитисячних до десятих часток секунди. Нервовий імпульс лежить в основі діяльності нервової системи.

Функція нейрона залежить від його форми: вона визначає, в яких місцях можливий прийом сигналів і до яких місць ці сигнали повинні бути підведені. У людини довжина мотонейрона, що передає сигнал від спинного мозку до м'яза стопи, може сягати 1 м. Виділяють три головні частини нейрона: тіло, дендрити, аксон. Тіло нейрона – біосинтетичний центр, де знаходиться ядро і майже всі рибосоми, ендоплазматичний ретикулум і апарат Гольджі. Дендрити являють собою систему розгалужених відростків, які відходять від тіла нейрона і збільшують поверхню прийому сигналів від інших клітин. Аксон – відросток нервової клітини, але він тільки один і набагато довший, ніж дендрити. Аксон проводить сигнали від тіла клітини до віддаленої мішені. Дальній кінець аксона

галузяться, що дає змогу передавати сигнал одночасно багатьом клітинам – виконавцям команди.

Сигнали, що проводяться нейронами, передаються від однієї клітини до сусідньої в особливих місцях контакту, званих синапсами. Ця передача здійснюється непрямим шляхом.

Термін «синапс» увів Ч. Шеррінгтон у 1897 році, він же висунув припущення, що відростки нервових клітин мовби «злипаються» між собою й утворюють єдину мембрану, що сприяє поширенню збудження з одного нейрона на інший. Складові частини синапсів – це пре-й постсинаптичні мембрани та синаптична щілина.

У пресинаптичних частинах утворюються та накопичуються специфічні хімічні речовини – медіатори, що сприяють передачі збудження.

Синапси можуть бути розташовані між відростками нейроцитів, їхніми тілами, між аксонами, а також між різними структурами інших тканин (міозитами, секреторними клітинами тощо). Описано синапси, які мають вигляд гудзиків, бляшок, кілець, кошиків тощо.

Синапси, розташовані між різними компонентами нервових клітин, називають нейрон-нейрональними, а утворені відростками нейроцитів та структурами інших тканин – периферичними синапсами, або нервовими закінченнями. Передача імпульсу від нейрона до клітини-«мішені» відбувається хімічним шляхом і дуже швидко. У цитоплазмі аксона (у його закінченні) є міхурці, заповнені особливою речовиною – медіатором. Коли імпульс доходить до міхурців, вони тріскають і вивільняють молекули медіатора, які потрапляють у міжклітинну рідину синаптичної щілини.

Відтак вони збуджують мембрану клітини-«мішені», збільшуючи її проникність для певних йонів. Так здійснюється передача імпульсів у нервовій системі, під час якої неабияку роль відіграють йони  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ . Після виконання функції передавача медіатори руйнуються спеціальними ферментами.

Клітини електрично ізольовані одна від одної: пресинаптична клітина відділена від постсинаптичної проміжком – синаптичною щілиною.

Зміна електричного потенціалу в пресинаптичній клітині обумовлює вивільнення речовини, названої нейромедіатором (або нейротрансмітером), яка дифундує через синаптичну щілину і спричиняє зміну електрофізіологічного стану постсинаптичної клітини. Таким чином, міжнейронна взаємодія зв'язана з перетворенням електричного сигналу в хімічний, а хімічного – знову в електричний.

Різниця потенціалів між внутрішнім і зовнішнім боками плазматичної мембрани (мембранний потенціал) залежить від розподілу електричного заряду. Заряд через мембрану нервової клітини переносить йони  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , причому проходять вони через біліпідний шар тільки спеціальними каналами. Під час відкривання чи закривання йонних каналів розподіл зарядів змінюється і відбувається зсув мембранного потенціалу. Таким чином, передача сигналу



нервовими клітинами залежить від каналів з регульованою проникністю – так званих каналів з «воротами». Є два типи таких каналів:

1) йонні канали з потенціал-залежними воротами, особливо  $\text{Na}^+$ - канали, які відіграють ключову роль у виникненні вибуху електричної активності, що забезпечує поширення сигналу від відростку нейрона;

2) йонні канали з ліганд-залежними воротами, які перетворюють позаклітинні хімічні сигнали в електричні; від них залежить функціонування синапсів.

Ці типи каналів властиві не тільки нейронам. Вони виявлені також в інших клітинах, наприклад, у м'язових волокнах, де виконують подібні функції.

У проведенні імпульсів у більшості нейронів найбільш важливі йони  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$ . Нейрони витрачають багато метаболічної енергії на відкачування з клітини йонів  $\text{Na}^+$  в обмін на йони  $\text{K}^+$  під час  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$ - фази плазматичної мембрани. У результаті роботи цієї помпи концентрація йонів  $\text{Na}^+$  всередині клітини майже удесятеро нижча, ніж ззовні, а йонів  $\text{K}^+$ , навпаки, значно менше ззовні, ніж всередині. Ця різниця концентрацій служить джерелом енергії, необхідної для створення потоку йонів через плазматичну мембрану. Запаси цієї енергії досить великі порівняно з дуже малими енергетичними витратами на поширення одного потенціалу дії і на пов'язаний із цим короткочасний йонний струм. Навіть, якщо  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$ -фазу інактивувати інгібітором, наприклад, убаїном, нервова клітина, діючи, як добре заряджений акумулятор, зможе провести кілька тисяч потенціалів дії, перш ніж запас енергії вичерпається. Оскільки навіть невеликий потік йонів, направлений всередину клітини, переносить достатній заряд, щоб зумовити значну зміну мембранного потенціалу. Тому можна вважати концентрації йонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$  всередині й ззовні клітини практично постійними навіть у той час, коли клітина перебуває у стані електричної активності: йонні струми, пов'язані з потенціалом дії, настільки малі, що обумовлюють лише незначну зміну йонних концентрацій. Залежність мембранного потенціалу від проникності мембрани складає основу електричної активності нейронів.

Уявімо собі нервову клітину у стані спокою, коли внутрішньоклітинні концентрації йонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$  визначаються рівновагою між йонними струмами, створюваними роботою  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$ -фази, та зворотним переходом йонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$  «униз» по градієнтах їх концентрацій через «канали втрати». Стан спокою у цьому випадку означає, що сумарний струм йонів через мембрану дорівнює нулю. Тобто, при потенціалі спокою струми  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  та інших йонів точно збалансовані таким чином, що сумарні заряди по обидва боки мембрани не змінюються. Рух окремого виду йонів через мембранні канали відбувається за рахунок енергії електрохімічного градієнта даного йона. Цей градієнт утворюють дві складові: градієнт напруги на мембрані та градієнт концентрації йона. Коли сили, створювані обома градієнтами, врівноважуються, електрохімічний градієнт дорівнює нулю, як і сумарний струм даного йона через мембрану.

Методи вивчення йонних каналів базуються на тому, що йонний струм може бути виміряний миттєво і з високою точністю.

Йони, що створюють трансмембранний струм, можна ідентифікувати, змінюючи концентрацію інших йонів у навколишньому середовищі. Наприклад, натрієвий струм через мембранні канали буде залежати від позаклітинної концентрації йонів  $\text{Na}^+$  і зникне, коли ця концентрація досягне рівня, при якому рівноважний натрієвий потенціал  $V_{\text{Na}^+}$  зрівняється з мембранним потенціалом  $V$ . Струми через канали «з воротами» і через канали «втрати» теж будуть змінюватися під час зміни трансмембранних концентраційних градієнтів, тому їх можна вивчати таким же способом. Потенціал-залежні канали можуть бути виявлені за раптовою зміною проникності мембрани для певного йона у разі різкої зміни  $V$  (мембранного потенціалу).

Ці методи дозволяють виявити «внесок» різних йонів у загальний струм й ідентифікувати струми, що протікають по каналах «з воротами». Але, якщо струм переноситься частково йонами  $\text{Na}^+$ , і частково йонами  $\text{K}^+$ , то чи проходять ці йони через одні й ті ж чи різні канали?

Відкриття токсинів, специфічних щодо каналів, допомогло дати відповідь на це питання. Наприклад, якщо в навколоклітинне середовище ввести токсин тетрадоксин з голкочеревної риби, то потенціал-залежні натрійові канали блокуються, тоді як калієвий струм залишається незмінним. З іншого боку, йони тетраетиламонію блокують потенціал-залежні калієві канали, але не впливають на натрієвий струм. Ці та інші спостереження вказують, що існують канали щонайменше двох різних типів: одні вибірково проникні для йонів  $\text{Na}^+$  і блокуються тетрадоксином; інші - проникні для йонів  $\text{K}^+$  і блокуються йонами тетраетиламонію.

Отже, потенціал-залежні канали – це такі канали, що відкриваються і закриваються у відповідь на зміну трансмембранного потенціалу. Це приводить нас до висновку про існування якогось простого механізму «включення» і «виключення» каналів, відповідальних за проведення сигналів, і що цей механізм дещо складніший, а істотну роль у ньому відіграє тимчасова затримка [4, с.308].

### **Поведінка каналу**

Поведінку каналу можна прослідкувати за допомогою методу фіксації напруги. Якщо мембранний потенціал підтримувати на рівні потенціалу спокою (приблизно 70 мВ), натрієвий струм практично відсутній; це означає, що майже всі натрієві канали закриті. Якщо тепер різко зсунути мембранний потенціал у позитивний бік, припустимо до 0 мВ, і втримувати клітину у такому деполяризованому стані, то потенціал-залежні натрієві канали відкриються і йони  $\text{Na}^+$  потечуть у клітину «вниз» за градієнтом концентрації. Натрієвий струм сягне максимуму приблизно через 0,5 мс після того, як встановиться нове значення потенціалу. Проте, вже через кілька мілісекунд струм впаде майже до нуля, навіть якщо мембрана залишатиметься деполяризованою. Значить, канали відкрились на якийсь момент і знову закрились. Тепер закриті канали

переходять в інактивований стан, який відрізняється від початкового закритого стану, коли вони ще були здатні відкритись у відповідь на деполяризацію мембрани.

Канали залишаються інактивованими доти, доки мембранний потенціал не повернеться до вихідного негативного значення й не закінчиться відновлюваний період тривалістю в кілька мілісекунд.

Флуктуації трансмембранного струму дають змогу припустити, що кожний окремий канал відкривається й закривається випадковим чином. Мембрана нервової клітини містить багато тисяч натрієвих каналів з потенціал-залежними воротами, тому загальний натрієвий струм складається зі струмів, що протікають через усі ці канали. Дослідженнями встановлено, що канал відкривається за принципом «все - або нічого». Відкриті канали мають однакову провідність, але відкриваються й закриваються незалежно один від одного. Звідси сумарний струм через мембрану всієї клітини з її численними каналами визначається не ступенем відкритості каналів, а вірогідністю бути відкритим для окремого каналу.

Канали вибірково проникні для певних струмів, вони не відкриваються поступово, а стрибкоподібно переходять з однієї дискретної конформації в іншу. Ці канали можуть бути або повністю відкриті, або повністю закриті, але ніколи не бувають відкриті або закриті частково.

Потенціал-залежні натрієві канали роблять нервову клітину чутливою до дії електричного поля і дають їй можливість проводити імпульси (потенціали дії). Поширення імпульсу по нервовому волокну залежить від кабельних властивостей цього волокна.

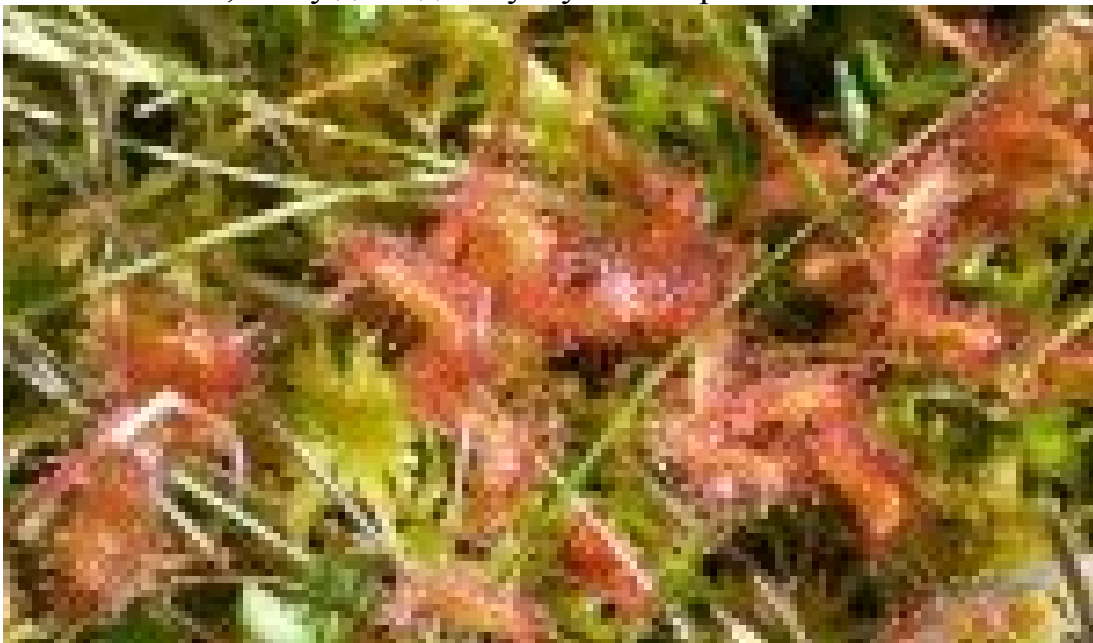
Коли під час отримання імпульсу мембрана на деякій ділянці деполяризується, то струм, який проходить тут через натрієві канали, деполяризує сусідні ділянки мембрани, де в свою чергу виникають потенціали дії. В аксонах нервових клітин хребетних висока швидкість проведення імпульсів досягається завдяки ізоляції поверхні аксона мієліновою оболонкою, яка залишає відкритими лише невеликі ділянки збудливої мембрани [4, с.309].

### Розділ 3. Електрика у рослинах

Чарльз Дарвін надавав важливого значення подразливості рослин. Він детально вивчив біологічні особливості комахоїдних представників рослинного світу, які відрізнялися високою чутливістю, і результати досліджень виклав у праці «Про комахоїдні рослини», яка побачила світ у 1875 році. Крім того, увагу великого природодослідника привернули різні рухи рослин. У сукупності всі дослідження наводили на думку, що рослинний організм дивно подібний до тварин.

Широке використання електрофізіологічних методів дозволило фізіологам тварин досягти значного прогресу у цій галузі знань. Ученими було встановлено, що в організмі тварини постійно виникає електричний струм (нервові імпульси), поширення яких і приводить до рухових реакцій. Так, наприклад, коли дослідники приєднували один кінець мідного дроту, що йшов від гальванометра, до поверхні щойно препарованого мускула, а інший – до його поперекового перетину, то стрілка приладу відхилялась від вихідного стану, що свідчило про проходження електричного струму. Якщо шляхом подразнення викликалось скорочення, то стрілка відхилялась у протилежний бік.

Чарльз Дарвін припускав, що подібні електричні явища мають місце і у листках комахоїдних рослин, які володіють досить сильно вираженою здатністю до руху. Проте сам він не перевіряв цю гіпотезу. На його прохання експерименти з Венериною мухоловкою були проведені у 1875 році фізіологом Оксфордського університету Бурданом Сандерсоном. Так, приєднавши листок цієї рослини до гальванометра, учений відмітив, що стрілка миттєво відхилилася. Отже, у живому листку цієї рослини виникають електричні імпульси. Коли дослідник викликав подразнення листків, торкнувшись до розміщених на їхній поверхні ворсинкам, то стрілка гальванометра відхилилася у протилежний бік, як і у досліді з мускулом тварини.



**Венерина мухоловка**

Німецький фізіолог Герман Мунк, який продовжив досліди Сандерсона, у 1876 році прийшов до висновку, що листя Венериної мухоловки в електронному відношенні подібні нервам, мускулам і електричним органам деяких тварин.



#### **Міміза сором'язлива**

У Росії електрофізіологічні методи були використані М. К. Леваковським для вивчення явищ подразливості у Сором'язливої мімізи. Як і цілий ряд інших видів рослин, вона змінює розташування листка у просторі залежно від часу доби. Це так званий «сон» - особливий тип руху як реакція на зміну інтенсивності освітлення. Листя закривається в темний час доби і знову відкривається на світлі. Листя також закривається під впливом інших подразників, таких як дотик, нагрівання, порив вітру або струшування. Ці види руху були названі сейсмонастичними. Рух відбувається, коли особливі шари клітин втрачають тургор. Тургор – це тиск, який здійснюється на клітинну стінку водою, яка міститься у вакуолях, та іншими компонентами клітини. Коли рослину турбують, в особливих ділянках, на стеблах відбувається викид хімічних речовин, що містять у собі йони калію. Ці йони спричиняють відтік води з клітинних вакуолей, внаслідок чого вода дифундує з клітини. Таким чином, клітина втрачає тургор і стискається: внаслідок цієї різниці пружності у різних шарах клітин, листочки складаються, а черешок листка опускається. У 1867 році він опублікував книгу під назвою «О движении раздражимых органов растений». В експериментах М. К. Леваковського найсильніші електричні сигнали спостерігались у тих екземплярах мімізи, які найбільш енергійно відповідали на зовнішні подразники. Якщо мімізу швидко нагріти, то мертві частини рослини не виробляють електричних сигналів. Виникнення електричних імпульсів учений спостерігав також у тичинках будяка і

чортополоху, у черешках листків росянки. Згодом було встановлено, що у будь-якої рослини можна виявити виникнення електричних потенціалів.

У нормальному стані клітин цитоплазма заряджена негативно по відношенню до своєї зовнішньої поверхні. Причиною цього є нерівномірний розподіл йонів хлору і калію, але менше кальцію, ніж зовні. Такий розподіл йонів, що визначає величину потенціалу спокою, пов'язано з тим, що у мембранах клітин знаходяться особливі молекули-переносники, які подібно насосу, перекачують йони всередину клітини.

Величина потенціалу спокою клітин Сором'язливої мімози дорівнює 160 мВ. Після подразнення відбувається швидке зменшення цієї величини до 20 мВ. У відповідь на подразнення виникає потенціал протилежного знаку, або потенціал дії. У клітинах мімози він дорівнює приблизно 140 мВ, а у комахоїдних рослин Венериної мухоловки й Альдрованди складає біля 100 мВ.



#### **Альдрованда пухирчата**

Поява потенціалу дії пов'язана з виходом йонів хлору із клітини, а можливо з надходженням кальцію всередину. Особливо детально це явище вивчено на гігантських клітинах водоростей хара і нітелли. У них потенціал дії виникає під впливом механічних, хімічних й електричних подразників, правда, у цих клітинах його поява не супроводжується рухом, як у Сором'язливої мімози або комахоїдних рослин. Проте завдяки величезним розмірам з'ясувалось, що у них зручно вводити електроди. Ось чому вони широко використовуються для вивчення електричних явищ у рослин.

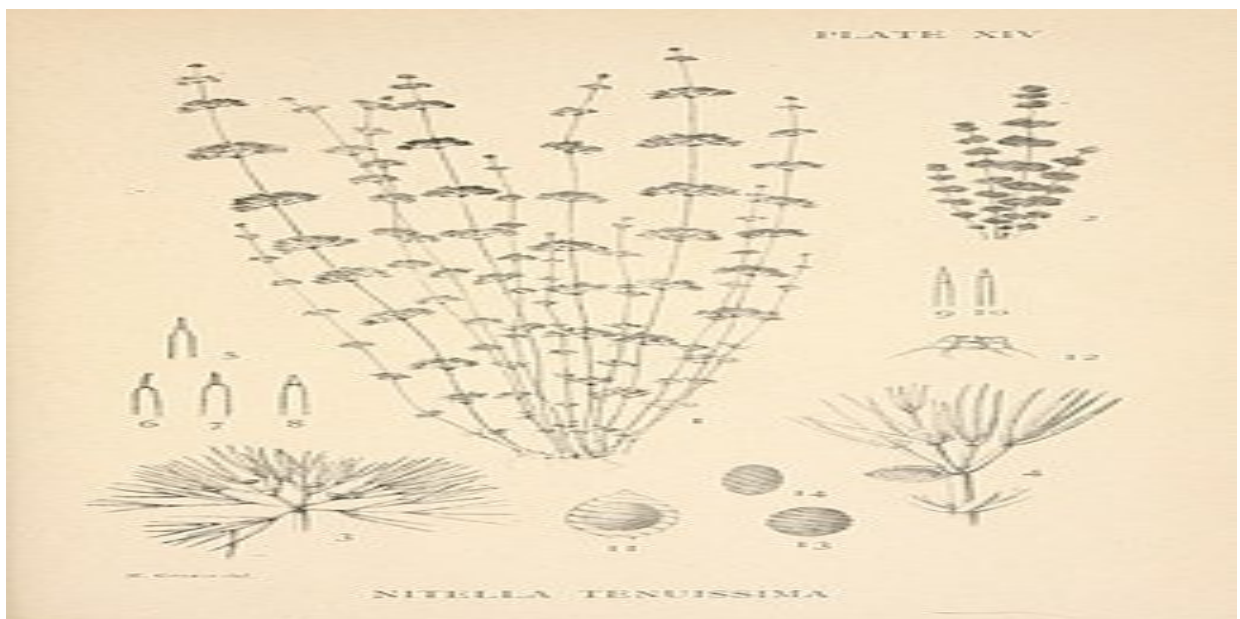
Від клітини, що піддалась подразненню, потенціал дії поширюється у мімози зі швидкістю 2-5 см/с, у Венериної мухоловки – 20 см/с, у соняшника – 1,3 см/с. Переміщення його відбувається, напевно, таким чином: потенціал дії

однієї клітини збуджує сусідню, у якій виникає власний потенціал дії, і т. ін. Збудження передається головним чином по судинним елементам.

Якщо повністю видалити із стебла провідні тканини, рослина не буде відповідати на подразнення генеруванням електричного потенціалу дії. Важливу роль у виробленні електричних імпульсів у провідній тканині відіграють йони калію. При калійному голодуванні не виникає потенціал дії у відповідь на подразнення. Не випадково у провідних тканинах рослин міститься велика кількість цього елемента.

У вищих рослин виразно проявляється здатність генерувати періодично виникаючі електричні імпульси у відповідь на дію постійного подразника. Уперше це було встановлено у 1936 році на клітинах водорості – нітелли.

Електричні імпульси, що поширюються по рослині, можна вловити з допомогою сучасних приладів і записати на паперовій стрічці. Зазвичай запис електричних імпульсів являє собою ледь хвилясту лінію. Проте варто занурити рослину у гарячу воду, як характер кривої різко зміниться, хвилі на паперовій стрічці значно збільшаться у розмірах.



### **Нітелла найтонша**

Електричні сигнали виявились дотичними до виконання різних функцій. Так, наприклад, механічне подразнення нектарників квітів липи викликає появу електричного імпульсу, що сприяє посиленню утворення і виділення нектару.

Електричні сигнали виникають і при дії світла на заростки папороті. Їхня роль полягає у стимуляції процесу запліднення. Аналогічне значення електричних сигналів і у заплідненні квіткових рослин. Зазвичай квітковий пилок заряджений позитивно, а приймочка – негативно. Ця обставина, напевне, відіграє значну роль у потраплянні пилку на приймочку маточки і у заплідненні. Вимірювання електричного поля навколо проростаючих пилкових зерен, проведені з допомогою спеціального електроду, показали, що вони генерують постійний електричний струм у декілька сотень пікоампер. У

пилковій трубці, яка проростає, струм досягає досить високої щільності (біля 60 мкА см<sup>2</sup>) і реєструється протягом усього періоду їхнього росту. При досягненні ними довжини 1 мм або більше, на фоні постійного струму виникають багаточисельні імпульси тривалістю біля 30 секунд з періодичністю у 60-100 секунд.



**Смородина чорна**

Правда, у смородини пиляки різноякісні за знаком електричного заряду. Позитивно заряджена фракція осідає на катоді, негативно заряджена – на аноді. Катодна фракція володіє більшою життєздатністю. Використання її при статевій гібридизації підвищує відсоток зав'язі ягід, вихід насіння, ягоди у цьому випадку більш крупні, а саджанці швидко укорінюються [3, с.299].



#### Розділ 4. Електрика і ріст рослин

У житті рослин електричні явища відіграють важливу роль. У відповідь на зовнішні подразники у них виникають дуже слабкі електричні імпульси. У зв'язку з цим можна припустити, що зовнішнє електричне поле може здійснити помітний вплив на темпи росту рослинних організмів.

Ще у XIX ст. учені встановили, що земна куля заряджена негативно по відношенню до атмосфери. На початку XX ст. на відстані 100 кілометрів від поверхні землі було виявлено позитивно заряджений прошарок – іоносферу. У 1971 році космонавти побачили її: вона має вигляд прозорої сфери, що світиться. Таким чином, земна поверхня і іоносфера являють собою два гігантських електрода, які створюють електричне поле, у якому постійно знаходяться живі організми.

Заряди між Землею і іоносферою переносяться аероіонами. Носії негативних зарядів стрімко піднімаються до іоносфери, а позитивні аероіони рухаються до земної поверхні, де вступають у контакт з рослинами. Чим більше негативний заряд рослини, тим більше вона поглинає позитивних іонів.

Можна припустити, що рослина певним чином реагує на зміну електричного потенціалу навколишнього середовища. Понад 200 років тому французький абат П. Берталон помітив, що біля громовідводу рослинність розкішніша, ніж на деякій відстані від нього. Пізніше його співвітчизник, учений Грандо, вирощував дві абсолютно однакові рослини, але одна з них знаходилась у природних умовах, а інша була накрита сіткою із дроту, що відгороджувала її від зовнішнього електричного поля. Друга рослина розвивалась повільно і виглядала гірше тієї рослини, що знаходилась у природному електричному полі. Грандо зробив висновок, що для нормального росту і розвитку рослинам необхідний постійний контакт із зовнішнім електричним полем. Проте до цього часу у дії електричного поля на рослину багато ще неясного.

Давно було помічено, що часті грози сприяють росту рослин. Правда, це ствердження потребує ретельної деталізації. Адже грозове літо відрізняється не лише частотою блискавок, але й температурою, кількістю опадів. А це фактори, що досить сильно впливають на рослину.

Досить суперечливі дані, що стосуються темпів росту рослин поблизу ліній електропередач (ЛЕП). Одні спостерігачі відзначають посилення росту під ними, інші – пригнічення. Деякі японські дослідники вважають, що високовольтні лінії негативно впливають на екологічну рівновагу.

Більш достовірним є той факт, що у рослин, які ростуть під високовольтними лініями виникають різні аномалії росту. Так, під лінією електропередач напругою 500 кВ у квітів гравілату збільшується кількість пелюсток до 7-25 замість звичних п'яти. В оману – рослини з родини складноцвітих – відбувається зростання кошиків у велике викривлене утворення.

Дослідів щодо впливу електричного струму на рослини досить багато. Так, дослідники проводили експерименти, у яких гібридні сіянці вирощувались у

великих ящиках з ґрунтом, через який пропускався постійний електричний струм. Було встановлено, що ріст сіяців при цьому посилювався. Проте в деяких випадках рослини гинули, а в інших давали небувалий врожай. Так, в одному з експериментів навколо ділянки, на якій росла морква, у ґрунт вставили металічні електроди, через які час від часу пропускали електричний струм. Врожай був щедрим – маса окремих коренеплодів досягала 5 кг. Проте наступні експерименти, на жаль, дали інші результати. Мабуть, дослідники випустили з поля зору певну умову, яка дозволила у першому експерименті з допомогою електричного струму отримати високий врожай.

Чому ж рослини краще ростуть у електричному полі? Учені Інституту АН СРСР у 70-ті рр. встановили, що фотосинтез протікає тим швидше, чим більша різниця потенціалів між рослинами й атмосферою. Так, наприклад, якщо біля рослини тримати негативний електрод і поступово збільшувати напругу (500, 1000, 1500, 2500 В), то інтенсивність фотосинтезу буде зростати. Якщо ж потенціал рослини і атмосфери близькі, то рослина перестає поглинати вуглекислий газ.

Складається таке враження, що електризація рослин активізує процес фотосинтезу. Так, дійсно, в огірків, яких помістили в електричне поле, фотосинтез протікає вдвічі швидше порівняно з контрольними.

Унаслідок цього у них утворювалась у чотири рази більше зав'язі, які швидше, ніж у контрольних рослин, перетворювались у зрілі плоди. Коли рослинам вівса подали електричний потенціал, що дорівнював 90 В, маса їхнього насіння збільшилась у кінці досліду на 44% у порівнянні з контрольними.

Пропускаючи через рослину електричний струм, можна регулювати не лише фотосинтез, але й кореневе живлення, адже необхідні рослинні елементи надходять зазвичай у вигляді йонів. Американські дослідники встановили, що кожний елемент засвоюється рослиною при певній силі струму.

Англійські біологи домоглись суттєвої стимуляції росту рослин табака пропускаючи крізь них постійний електричний струм силою всього в одну мільйону частку ампера. Різниця між контрольними і дослідними рослинами ставала очевидною вже через 10 днів після початку експерименту, через 22 дні вона вже була досить помітною. З'ясувалось, що стимуляція росту можлива лише в тому випадку, якщо до рослини підключали негативний електрод. У разі зміни полярності електричний струм, навпаки, дещо гальмував ріст рослин.

У 1984 році у журналі «Квітникарство» була опублікована стаття про використання електричного струму для стимуляції коренеутворення у живців декоративних рослин, особливо у тих, які важко вкорінюються, наприклад, живці троянд. Саме на них і були поставлені досліди у закритому ґрунті. Живці декількох сортів троянд висаджували у перлітовий пісок. Двічі на день їх поливали і не менше трьох годин піддавали їх електричному струму (15 В і до 60 мкА). При цьому негативний електрод під'єднувався до рослини, а позитивний занурювали у субстрат. За 45 днів прижилось 89% живців, причому у них з'явилися добре розвинені корені. У контрольних живців (без

електростимуляції) за 70 днів вихід укорінених живців склав 75%. Проте корені у них були розвинені значно слабше. Таким чином, електростимуляція скоротила термін вирощування живців у 1,7 разів, у 1,2 рази збільшила вихід продукції з одиниці площі. Як бачимо, стимуляція росту під дією електричного струму спостерігається у тому випадку, якщо до рослини приєднується негативний електрод. Це можна пояснити тим, що сама рослина зазвичай заряджена негативно. Підключення негативного електрода збільшує різницю потенціалу між нею і атмосферою, а це, як уже відзначалось, позитивно відбивається на фотосинтезі.

Позитивну дію електричного струму на фізіологічний стан рослин використовували американські дослідники для лікування пошкоджень кори дерев, ракових утворень і т. ін. Весною всередину дерева вводили електроди, через які пропускали електричний струм. Тривалість обробки залежала від конкретної ситуації. Після такої дії кора оновлювалась.

Електричне поле впливає не лише на дорослі рослини, але й на насіння. Якщо їх на деякий час помістити у штучно створене електричне поле, то вони скоріше дадуть дружні сходи. У чому ж причина цього явища? Учені передбачають, що всередині насіння внаслідок впливу електричного поля розривається частина хімічних зв'язків, що приводить до виникнення уламків молекул, у тому числі частина з надлишковою енергією вільних радикалів. Чим більше активних часток всередині насіння, тим вища енергія їх проростання.

На думку учених, подібні явища виникають в разі дії на насіння і інших випромінювань: рентгенівського, ультразвукового, радіоактивного.

Повернемось до результатів досліду Грандо. Рослина, яку помістили у металічну клітку, і таким чином була ізольована від природного електричного поля, погано росла. Між іншим, у більшості випадків, насіння зберігається у залізобетонних приміщеннях, які по суті, являють собою точнісінько таку ж металічну клітку. Чи не наносимо ми тим самим шкоду насінню? І чи не тому, зберігаючи його таким чином, насіння досить активно реагує на дію штучного електричного поля?



**Бавовник звичайний**

У фізико-технічному інституті Академії наук Узбекистану у свій час була розроблена установка для передпосівної обробки насіння бавовника. Насіння рухається під електродами, між якими виникає так званий «коронний» розряд. Продуктивність установки – 50 кг на годину. Обробка дозволяє отримати додаткову частку врожаю у 5 центнерів з гектару. Опромінення підвищує схожість насіння більш ніж на 20%, коробочки рослини досягають на тиждень раніше звичного, а волокно стає міцнішим і довшим, краще протидіє різним захворюванням, особливо такому небезпечному, як вілт [3, с.202].

Треба зауважити, що подальше вивчення впливу електричного струму на рослини дозволить ще більш активно керувати їхньою продуктивністю.

Отже, наведені факти свідчать про те, що у світі рослин ще багато загадкових таємниць.

## Розділ 5. Електричні органи і електрорецептори. Генерація електричних розрядів

Електричні органи є прекрасним прикладом еволюційної конвергенції – м'язи, а в деяких випадках нервові клітини перетворилися на електричні органи. Мабуть, електричні органи виникали в процесі еволюції тварин кілька разів, і їх функціональні властивості пристосовані до конкретних особливостей екології цих тварин. Високовольтними електричними органами володіють лише декілька родин риб: до них відносяться морські електричні скати (і, можливо, також звідарі) прісноводні електричні вугрі і соми; для них характерний рефлекторний високовольтний розряд [18].

Напруга електричного струму, що створюється сомами, досягає 400, а вуграми – 600 В (для порівняння нагадаємо, що напруга струму в побутовій електромережі наших міст і сіл всього 127-220 В). При цьому потужність електростанцій вугра дорівнює 1000 вт [16].

Морські скати, прісноводні дзьоборилі, гімнархові, гімнотиди і деякі інші риби володіють невеликою електричною потужністю; за винятком скатів, вони майже безперервно зі змінною частотою і регулярністю генерують розряди імпульсів

Електричні органи представлені безліччю типів, тому для позначення будь-яких клітин, здатних до генерації електричних розрядів (незалежно від їхнього ембріонального походження), зручно застосовувати загальний термін електроцит. Великі пласкі електроцити називаються електропластинками.

Будова електричних органів риб дуже різноманітна. Так, електричний вугор має три такі органи. Електричний орган мормируса розташований поблизу його хвоста. Відповідний орган малоптеруруса утворює підшкірний шар навколо тіла риби. У електричного ската подібний орган розташований в хвості. Електричні органи скату іншого виду мають форму, подібну до нирки, і розташовані в кожному крилі-плавнику. Структура цих органів шарувата. Напрямок розряду перпендикулярний площині тіла риби.

Роль електричних органів велика, вони служать для нападу і для захисту, а також є частиною дуже чутливої навігаційно-локаційної системи.

Використання рибами різної напруги можна пояснити так: тим, хто мешкає в прісній воді (наприклад, вугрові), необхідна висока напруга, оскільки прісна вода володіє великим електричним опором і для виникнення електричного розряду потрібна значна напруга; ті, що живуть в солоній воді (наприклад, ромбовидний скат) пристосувалися до меншого її опору і тому виробляють меншу напругу [9].

У сильноелектричного ската *Torpedo* (з морських пластинчастозябрових) електричний орган містить приблизно 45 дорсовентральних стовпчиків з 700 електроцитів (або електропластинок) в кожному, що розташовані у м'язовій тканині риби. Кожен такий стовпчик є своєрідною акумулюючою «банкою», в якій розташовані сотні дисків, наповнених желеподібною речовиною. Нижня та верхня частини таких стовпчиків мають різний електричний потенціал, який складається з різності потенціалів між багаточисельними дисками, які

утворюють стовпчик. Усе разом утворює ефективний підводний «генератор-акумулятор». Електропластинки в стовпчику сполучені послідовно, а самі стовпчики – паралельно. Розряд *Torpedo* зазвичай складає 20-30 В, іноді 50 В і створює в морській воді струм в декілька ампер. Усі пластинки в стовпчику рясно іннервуються з вентрального боку, на якому генеруються градуальні, що не розповсюджуються, постсинаптичні потенціали (ВПСП) (вентральний постсинаптичний потенціал); при цьому вентральний бік пластинки негативний. Мембрана іннервованої поверхні клітини є холінорецептивною; відповіді блокуються тубокурарином і збільшуються за тривалістю езеринном. Неіннервована мембрана володіє нижчим опором порівняно з іннервованою; шкіра електричних органів також має низький опір, тому струм може протікати навіть у тому випадку, якщо деполяризується тільки одна поверхня клітини.



### Електричний скат

Ця система керується за допомогою одного з відділів головного мозку, який виконує функцію своєрідного реле-вмикача, який змушує нервовими імпульсами накопичувати напругу між дисками, що призводить до накопичення напруги саме між спинною та червонною частиною ската. Розряд може здійснюватися також по команді з мозкового центру. При цьому скат може регулювати силу струму, тривалість та потужність розряду.

У іншій групі морських пластинчастозябрових - *Rajidae* – електричні органи розташовані в основі хвоста; вони утворені чашоподібними або дископодібними електроцитами. Іннервована поверхня кожного електроцита генерує ВПСП (вентральний постсинаптичний потенціал) тривалістю 50 мс або більше.

Морський звіздар *Astroscopus* має розташовані назвні від ока м'язи, видозмінені в електричні органи, якими він користується для того, щоб паралізувати свою здобич. Як і у торпедо і скатів, іннервована поверхня кожного електроцита у звіздара дає негативний ВПСП (вентральний

постсинаптичний потенціал) (10-20 мВ), який є холінергічним за своєю природою. Неіннервована поверхня володіє невеликим електричним опором.

Таким чином, у всіх морських електричних риб розряд є постсинаптичними потенціалами, які арифметично складаються при послідовному з'єднанні електроцитів. Мембрани електроцитів електрично незбудливі, але іннервований бік мембрани стимулюється ацетилхоліном; неіннервований бік володіє невеликим опором або здатністю до затриманого випрямляння. Зовнішній струм, особливо створюваний *Torpedo* і *Astroscopus*, є дуже сильним в морській воді, яка має низький опір.



### Електричний вугор

Сильноелектричний вугор *Electrophorus*, що мешкає в Амазонці, має декілька електричних органів; основний з них містить в кожному стовпчику близько 1000 подовжньо орієнтованих пластинок. Окремі імпульси досягають в розімкненому ланцюзі 400 В, а при короткому замиканні сила струму доходить до 1А. Кожний розряд представляє зазвичай серію з 305, іноді 20-30 імпульсів. Поодинокі електропластинка має потенціал спокою 90 мВ (негативний з внутрішнього боку) при вимірюванні на будь-якій з поверхонь. Електричні органи багаті ацетилхоліном (АХ) і ацетилхолінестеразою (АХЕ), і ймовірно, АХ є медіатором. Спайки (нервовий або м'язовий імпульси) обумовлені збільшенням вхідного струму натрію і блокуються тетрадоксином. Опір пасивного неіннервованого боку менший, ніж опір іннервованої мембрани. Так, іннервована мембрана складається з ділянок синаптичного типу, які чутливі до АХ і електрично незбудливі, і електрично збудливих ділянок, що чергуються з ними, в яких виникають спайки. АТФ гідролізується при розряді і регенерується з креатинфосфату.

Слабку електричну активність проявляють деякі гімнотиди і дзьоборилі прісноводні риби. Їх електроцити генерують спайки, причому у різних видів властивості двох поверхонь, можуть розрізнятися так, що спайки бувають дво- і трифазними.

У деяких дзьоборилих риб електроцит має вид стебла, яке розгалужується і рясно іннервується.



### Електричний сом

У сильноелектричного сома *Malapterurus*, що мешкає в річках африканського континенту, один гігантський нейрон іннервує декілька мільйонів електроцитів на одному боці тіла. Іннервований бік кожного електроцита генерує невеликий короткочасний спайк за ним слідує великий спайк на неіннервованій поверхні, іноді з двома максимумами. Таким чином, іннервована сторона дає ВПСП (вентральний постсинаптичний потенціал) і короткий спайк, який розповсюджується на іннервовану сторону, де тривалість спайка більша [18].

У слабкоелектричних і деяких неелектричних риб є електрорецептори, які є модифікованими рецепторами бічної лінії. Вони здатні виявляти дуже слабкі подовжні поля, напруженість яких складає  $10^{-7}$ -  $10^{-8}$  В см<sup>-1</sup>. Рецептори клітини передають сигнали закінченням сенсорного нерву зазвичай через хімічний синапс, а сенсорне кодування здійснюється головним чином за допомогою зміни характеру послідовності спонтанних імпульсів. Таким чином, структури, що існували раніше, – м'язи і рецептори бічної лінії – перетворилися в органи генерації і виявлення електричних імпульсів [18].

Тонічні електрорецептори, наприклад, такі, як у бічній лінії у сома і в ампулах Лоренцині у пластинчастозябрових, є у багатьох видів риб, що не володіють електричними органами. Вони виявляють потенціали дії дихальних і плавальних м'язів. Частота їх спонтанної спайкової активності може змінюватися під дією слабких струмів.





### **Електричний сом**

Щоб керувати таким складно влаштованим органом знадобилося створити спеціальний командний пункт. Тому в електричних риб з'явився особливий відділ мозку – електричні долі і овальні ядра в довгастому мозку. Овальні ядра – верховний командний пункт, який ухвалює рішення про застосування грізної зброї і віддає наказ в електричні долі. Тут здійснюється найскладніша робота з координації розряду. Адже для того, щоб розряд досяг максимальної сили, всі пластинки повинні розрядитися одночасно. Цим і зайняті електричні долі [16].

## Розділ 6. Поведінкові реакції електричних риб і скатів

Електричні органи можуть виконувати дві функції – оглушення жертви і електролокація. Більшість слабкоелектричних риб мешкають в каламутній воді або активні вночі. Вони посилають постійні серії імпульсів і виявляють невеликі зміни електричного поля навколишнього середовища; деякі з них для ретельнішого зондування середовища змінюють частоту посланих імпульсів. Сильноелектричні риби дають могутні розряди, які оглушають жертву або хижака. Деякі риби, наприклад, *Electrophorus*, крім основного органу, що випускає високовольтні імпульси, мають органи, які безперервно генерують низьковольтні сигнали. Серед слабкоелектричних риб Амазонки у «низькочастотних» видів електричні органи походять з м'язів, а органи «високочастотних» видів утворені з нервів [18].

Є риби, що мають не тільки електростанції, але і спеціальний орган, дуже чутливий до електрики, наприклад, у Нільського довгорила електростанція генерує 300 розрядів в секунду, створюючи навколо риб слабе електричне поле дуже постійної форми з силовими лініями, що сходяться на рівні голови. Електричні риби на відміну від усіх інших навіть плавають, не згинаючи власного тіла, щоб не порушити електричне поле, що оточує їх. Якщо ж поблизу з'явиться крупна риба, однорідність електричного поля порушиться. Тіло риби більш електропровідне, ніж навколишня прісна вода, тому силові лінії зрушаються у бік риби, що наближається. Електрочутливі прилади довгорила це відразу уловлюють, і він тікає.

Своєрідний локатор служить риbam не тільки для того, щоб рятуватися від ворогів. З його допомогою вони вільно обходять перешкоди, так само, як кажани за допомогою свого ехолокатора. Більшість предметів, з якими риби можуть зіткнутися у воді, погано проводять електрику. Силові лінії від таких предметів відштовхуються, що дозволяє довгорилам відрізняти живі предмети від неживих.

За допомогою електричної локації знаходять свою здобич прісноводні міноги. У каламутній воді прісноводних водоймищ ця здатність конче необхідна. Дивовижна істота – риба-ніж, що живе у берегів Америки, в тропічній частині Атлантичного океану, несе свій локатор на хвості. Тому розколини між скель і проходи в підводній рослинності вона досліджує, задкуючи задом і засовуючи хвіст у кожную дірку.

Близький родич довгорилів – гімнарх користується радаром під час полювання, точно визначаючи з його допомогою місцезнаходження своєї здобичі. Щоб радар довгорилів та інших риб задовольняв своїм вимогам, органи розташовані в шкірі, що сприймають струм, повинні мати дуже тонку чутливість. Дійсно, гімнарх «помічає» зміни сили електричного струму всього в 0,000000000000003 ампера. Така чутливість дає можливість рибі відрізняти нормального піскаря від наживки, в тілі якої заховали крихітний сталевий гачок. Можете бути упевненими, небезпечну приманку гімнарх обійде стороною [1, с.134]. Першим дослідником, який вивчав генерацію електричних імпульсів у гімнарха став французький вчений Андре Флоріон. Учений шляхом

посилення сигналів у 25 разів і їх обробки виявив, що періодичність сигналів настільки точна, що не поступається кварцевому осцилятору. Практично риба є біологічним годинником, що без перебоїв може функціонувати біля 15 років при триманні його в акваріумі.



**Гімнарх**

Високою електрочутливістю наділені не тільки риби, але і амфібії. Органом, що сприймає електрику, служить у них бічна лінія, а у скатів - ампули Лоренціні.

Усі звичайні скати, як і гімнарх, мають власні малопотужні електростанції.

Про те, як вони використовуються, ми майже нічого не знаємо, але про електрочутливість скатів вже накопичилися деякі відомості. Так, наприклад,



**Мальки електричного ската**

самки електричного ската народжують від 8 до 14 маленьких мальків, розміром у 5-6 см. Не дивлячись на мініатюрність, електричні скати з самого дитинства володіють здатністю виробляти електроенергію.

Ампули Лоренцині відомі давно. Їх у 1678 році описав учений, ім'я якого і присвоєно цим утворенням. Ампули Лоренцині володіють дуже високою чутливістю до край слабкої напруги електричного поля. Скат морська лисиця здатний відчувати електричне поле з градієнтом до 0,02-0,01 мікрвольта на сантиметр і відповідати на подібні дії уповільненням серцевих скорочень, тобто скати в 30-50 разів чутливіші за гімнарха.

Тепер став зрозумілим устрій ампул Лоренцині. Електропровідність шкіри велика. Щоб електрорецептор, що знаходиться в її товщі, володів високою чутливістю, його довелося з'єднати із зовнішнім середовищем спеціальним провідником. Цю функцію і виконує канал, заповнений речовиною, яка добре проводить електрику. Стінки каналу і самої ампули служать для електрорецептора ізолятором, що оберігає від електричних розрядів власну мускулатуру ската. В епітелії ампули розташовані рецепторні клітини, до яких підходять нервові волокна. Вершини клітин, забезпечені війками, виглядають в просвіт ампули. Ці війки і служать сприймаючим елементом рецептора.

За допомогою свого електрорецептора морська лисиця може уловлювати біоелектричні потенціали, що виникають у тілі інших риб. Це дозволяє скатам знаходити на піщаних мілинах молоденьких камбал, що виникають в їхній мускулатурі під час дихальних рухів, і нападати на нічого не підозрюючих риб.

Підводний осцилограф – знахідка для парапсихології. Той, кому доводилося спостерігати в морі за поведінкою зграйних риб: ставрид, зубариків, - ймовірно, не раз захоплювався злагодженістю маневрів зграї, коли десятки, сотні або навіть тисячі риб одночасно як по команді, змінюють напрям руху. Хто дає цю команду, як вона передається, учені поки не знають. Можливо, для «передачі думок» на відстань риби користуються слабкими електричними сигналами. Адже біоструми виникають у всіх м'язах і нервах, а ще раніше в мозку, який посилає до робочих органів свої накази. Ці розпорядження можуть передаватися і за межі риби, адже морська вода відмінний електропровідник [16].

## Розділ 7. Біохімія електрики

Минуло два століття, перш ніж людству вдалося розкрити таємницю живої електрики. Поки не був винайдений електронний мікроскоп, учені не могли навіть собі уявити, що навколо клітини знаходиться справжня «митниця» зі своїми суворими правилами «паспортного контролю». Мембрана тваринної клітини – тонка, не видима неозброєним оком оболонка, володіючи напівпроникними властивостями, є надійним гарантом збереження життєздатності клітини (підтримання її гомеостазу).

Але повернемося до електрики. Який існує взаємозв'язок між мембраною клітини і живою електрикою?

Отож, перша половина ХХ ст., 1936 рік. В Англії зоолог Джон Юнг публікує методуку препарування нервового волокна головоногого молюска. Діаметр волокна досягав 1 мм. Такий видимий оку «гігантський» нерв зберігав здатність проводити електрику навіть поза організму у морській воді. Це був той самий «золотий ключик», з допомогою якого були відкриті двері у таємницю живої електрики.

Минуло лише три роки, і співвітчизники Юнга – професор Ендрю Хакслі і його учень Алан Ходжкін, озброївшись електродами, поставили серію експериментів на цьому нерві, результати яких перевернули світогляд і «запалили зелене світло» на шляху до електрофізіології.

Дороговказом у цих дослідженнях стала книга Гальвані, а саме опис ним струму пошкодження: якщо м'яз перерізати, то електричний струм виливається із нього, що стимулює його скорочення. Для того, щоби ці експерименти здійснити на нервовому волокні, Хакслі проткнув двома тонкими, як волосинки, електродами мембрану нервової клітини, помістивши їх таким чином у її вміст (цитоплазму). Але тут його чекала невдача. Йому не вдалось зареєструвати електричні сигнали. Тоді він вийняв електроди і розмістив їх на поверхні нерву. Результати знову були негативні. Здавалосьь фортуна відвернулася від учених. Залишався останній варіант – один електрод помістити всередині нерву, а інший залишити на його поверхні. І ось, вже через 0,0003 секунди був зареєстрований електричний імпульс від живої клітини. Було очевидно, що за таку мить імпульс не може виникнути знову. Це означало лише одне: заряд сконцентрований на непошкодженій клітині, яка перебуває у спокої.

У наступні роки подібні досліді були пророблені на численних інших клітинах. З'ясувалось, що всі клітини заряджені і що заряд мембрани є невід'ємним атрибутом її життя. Допоки клітина жива, у неї є заряд. Однак залишалось все ще неясним, яким чином клітина заряджається. Задовго до експериментів Хакслі, російський фізіолог М. А. Бернштейн (1896-1966) опублікував свою книгу «Електробіологія» (1912). У ній він, немов би провидець, теоретично розкрив головну таємницю живої електрики – біохімічні механізми виникнення заряду клітини. Дивно, але через декілька років дана гіпотеза була блискуче підтверджена в експериментах Хакслі, за що він і був нагороджений Нобелівською премією.

Отже, які ж це механізми? Як відомо, все геніальне просте. Так, виявилось і у цьому випадку. Наш організм складається з води, а точніше з розчину солей і білків. Якщо заглянути всередину клітини, то виявиться, що її вміст перенасичено йонами  $K^+$  (всередині їх приблизно у 50 разів більше, ніж за її межами). Між клітинами, у міжклітинному середовищі, переважають йони  $Na^+$  (тут їх приблизно у 20 разів більше, ніж у клітині). Така нерівновага активно підтримується мембраною, котра подібно регулювальнику, пропускає через свої «ворота» одні йони і не пропускає інші.

Мембрана, ніби бісквітний пиріг, складається із двох рихлих шарів складних жирів (фосфоліпідів), товщу яких пронизують, як бусинки, білки, які виконують найрізноманітніші функції, зокрема вони можуть служити своєрідними «воротами» або каналами. Всередині таких білків є отвори, які можуть відкриватися і закриватися за допомогою особливих механізмів. Для кожного типу йонів існують свої канали. Наприклад, рух іонів  $K^+$  можливий лише через  $K^+$  - канали, а  $Na^+$  - через  $Na^+$  - канали.

Коли клітина знаходиться у стані спокою, для іонів  $K^+$  вмикається зелене світло і вони без перешкод покидають межі клітини через свої канали, направляючись туди, де їх мало, щоб урівноважити свою концентрацію. Пригадаймо дослід з фізики. Якщо взяти стакан з водою і капнути у нього розведений перманганат калію, то через певний час молекули цієї речовини рівномірно заповнять весь об'єм стакана, зафарбувавши воду у малиновий колір. Це класичний приклад дифузії. Аналогічний процес відбувається і з йонами  $K^+$ , які є у надлишку у клітині і мають завжди вільний вихід через мембрану. Йони ж  $Na^+$ , як персона non grata, не мають привілей з боку мембрани клітини, яка перебуває у стані спокою. У цей момент для них мембрана як неприступна фортеця, проникнути крізь яку майже неможливо, оскільки всі  $Na^+$  канали закриті.

Але причому тут електрика? Справа у тому, що, як було зазначено вище, наш організм складається із розчинних солей і білків. У даному випадку мова йде про солі. Що таке розчинна сіль? Це дуєт зв'язаних між собою позитивних катіонів і негативних аніонів кислот. Наприклад, розчин хлориду калію – це  $K^+$  і  $Cl^-$ . До речі, фізіологічний розчин, котрий широко використовується в медицині для внутрішньовенних вливань, являє собою розчин хлориду натрію –  $NaCl$  (кухонна сіль) у концентрації 0,9%.

У природних умовах просто йонів  $K^+$  або  $Na^+$  поодинці не буває, вони завжди перебувають з аніонами кислот –  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$  і т. ін., і у звичайних умовах мембрана непроникна для негативних часток. Це означає, що коли йони  $K^+$  рухаються через свої канали, зв'язані з ними аніони, як магніти, тягнуться за ними, але, не маючи можливості вийти назовні, скупчуються на внутрішній поверхні мембрани. Оскільки за межами клітини, у міжклітинному середовищі, домінують йони  $Na^+$ , тобто позитивно заряджені частки, у додаток до них постійно просочуються йони  $K^+$ , на зовнішній поверхні мембрани концентрується надлишковий позитивний заряд, а на її внутрішній поверхні – негативний. Таким чином, клітина у стані спокою «штучно» стримує

нерівновагу двох важливих йонів -  $K^+$  і  $Na^+$ , у силу чого мембрана поляризується за рахунок різності зарядів по її обидва боки. Заряд у стані спокою клітини називають мембранним потенціалом спокою, котрий дорівнює приблизно – 70 мВ. Саме такої величини заряд був уперше зареєстрований Хакслі на гігантському нерві моллюска.

Коли стало зрозуміло, звідки береться «електрика» у клітині у стані спокою, то виникає питання: куди вона зникає, якщо клітина працює, наприклад, коли наші нерви скорочуються? Достатньо було заглянути всередину клітини у момент її збудження. Коли клітина реагує на зовнішні або внутрішні подразники, у цей час миттєво, як за командою, відкриваються всі  $Na^+$  канали і йони  $Na^+$  врівноважують свою концентрацію по два боки мембрани, йони  $K^+$  як і до того повільно покидають клітину. Вихід йонів  $K^+$  настільки повільний, що, коли йон  $Na^+$  нарешті проривається через неприступні стінки мембрани, їх там залишається ще достатньо багато. Тепер вже всередині клітини, а саме на внутрішній поверхні мембрани, сконцентрується надлишковий позитивний заряд. На її ж зовнішній поверхні буде негативний заряд, тому що, як і у випадку з  $K^+$ , за  $Na^+$  попрямує ціла армія негативних аніонів, для яких мембрана, як і раніше непроникна. Утримувані на її зовнішній поверхні електростатичними силами натягу, ці «уламки» від солей утворять тут негативне енергетичне поле. Це означає, що у момент збудження клітини ми будемо спостерігати реверсію заряду, тобто зміну його знаку на протилежний. Цим і пояснюється, чому заряд при збудженні клітини змінюється з негативного на позитивний. Існує ще один важливий момент, який у свій час описав Гальвані, але не зміг правильно пояснити. Так, коли він пошкоджував м'яз, він скорочувався, на той час йому здавалось, що це струм пошкодження і він «виливається» з м'язу. У певному сенсі слова його були пророчими. Клітина дійсно втрачає свій заряд, коли працює. Заряд існує у тому разі, коли є різниця між концентраціями йонів  $Na^+$  і  $K^+$ . При збудженні клітини чисельність йонів  $Na^+$  по два боки мембрани однакова, до цього ж стану прагне і  $K^+$ . Саме тому при збудженні клітини заряд зменшується і стає рівним +40 мВ.

Коли загадку «збудження» розгадали, неминуче постало друге питання: як клітини приходять у норму? Адже не вмирає ж вона після того як попрацює. І дійсно, через кілька років учені знайшли цей механізм. Ним виявився білок, вбудований у мембрану, але це був незвичний білок. З одного боку, виглядав він так само, як і білки-канали. А з іншого, на відміну від своїх побратимів, цей білок дорого брав за свою роботу, а саме енергією, такою цінною для клітини. Причому придатна для його роботи енергія повинна бути особлива, у вигляді молекул АТФ (аденозинтрифосфорної кислоти). Ці молекули спеціально синтезуються на «енергетичних станціях» клітини – мітохондріях, бережно там зберігаються і при необхідності з допомогою спеціальних переносників доставляються до місця призначення. Енергія із цих «боєголовок» вивільняється при їх розкладі і витрачається на різні потреби клітини. Зокрема, у цьому випадку ця енергія потрібна для роботи білка, який отримав назву Na/K

– АТФ, основна функція якого полягає в тому, щоб подібно човнику, перевозити  $\text{Na}^+$  назовні із клітини, а  $\text{K}^+$  у протилежному напрямку.

Таким чином, щоб відновити втрачені сили, необхідно попрацювати. Тут і криється реальний парадокс. Коли клітина працює, то на рівні клітинної мембрани цей процес протікає пасивно, а для того щоб відпочити, їй потрібна енергія [15, с.18-20].



## Розділ 8. Як нерви «розмовляють» між собою?

Нервові клітини, або нейрони, сприймають, проводять і передають електричні сигнали. Значення цих сигналів різне і залежить від ролі, яку відіграє ця клітина у функціонуванні нервової системи в цілому. У мотонейронах (рухових нейронах) сигнали служать командами для скорочення певних м'язів. У сенсорних (чутливих) нейронах сигнали передають інформацію про подразники (світлові, механічні, хімічні тощо), які впливають на ту чи іншу ділянку тіла. Сигнали інтернейронів (вставних нейронів) являють собою результати сумісної переробки сенсорної інформації з кількох різних джерел, які обумовлюють формування адекватних рухових команд. Природа усіх цих сигналів однакова й полягає у зміні електричного потенціалу на плазматичній мембрані нейрона. Передача сигналів ґрунтується на тому, що електричне збудження, яке виникло в одній ділянці клітини, поширюється на інші ділянки. Якщо немає додаткового підсилення, ці збудження затухають у міру віддалення від їхніх джерел. На коротких відстанях затухання незначне, тому нейрони проводять сигнали пасивно, без посилення. Проте для передачі на значну відстань такого пасивного поширення сигналу недостатньо. Тому в нейронів з довгими відростками є активний сигнальний механізм. Електричний стимул, сила якого перевищує певну порогову величину, зумовлює вибух електричної активності, яка поширюється з великою швидкістю вздовж плазматичної мембрани нейрона. Цю біжучу хвилю збудження називають потенціалом дії або нервовим імпульсом. Потенціал дії передає інформацію з одного кінця нейрона на інший без затухання зі швидкістю до 100 м/с, а в деяких нейронах ще швидше.

Функція нейрона залежить від його форми: вона визначає, в яких місцях можливий прийом сигналів і до яких місць ці сигнали повинні бути підведені. У людини довжина мотонейрона, що передає сигнал від спинного мозку до м'яза стопи, може сягати 1 м.

Якщо вколоти палець, то рука миттєво відсмикнеться. Тобто при механічній дії на рецептори шкіри збудження, що виникає у даній локальній точці, досягає головного мозку і повертається звідти, на периферію, для того, щоби ми могли адекватно відреагувати на ситуацію. Це приклад природженої реакції, або безумовних рефлексів, до яких відносяться багато захисних відповідей, таких, як кліпання, кашель, чхання.

Яким же чином збудження, що виникає на мембрані однієї клітини, здатне рухатися далі? Перш ніж відповісти на це питання, варто пригадати будову нервової клітини – нейрона, суть «життя» якого вбачається у проведенні збудження або нервових імпульсів. Отже, нейрон, немов летюча комета, складається із тіла нервової клітини, навколо якого ореолом розміщуються безліч коротких відростків – дендритів і довгого «хвоста» - аксона. Саме ці відростки служать своєрідними проводами, по яким тече «живий струм». Оскільки вся ця складна конструкція являє собою єдину клітину, то відростки нейрона володіють таким самим набором йонів, як і його тіло. Що ж являє собою процес збудження локальної ділянки нейрона? Це якесь збудження

«спокою» його зовнішнього і внутрішнього середовища, яке виражається у вигляді спрямованого руху йонів. Збудження, яке виникло у тому місці, на яке припав подразник, далі по ланцюгу поширюється за тими принципами, що на цій ділянці. Лише тепер подразником для сусідніх ділянок буде визначатися не зовнішній стимул, а внутрішні процеси, що викликані потоками йонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$  і зміною заряду мембрани. Цей процес подібний тому, як поширюються хвилі від каменю, який кинули у воду. Так само, як і у випадку з камінням, біострум по мембрані нервового волокна поширюється коловими хвилями, викликаючи збудження все більш віддалених ділянок.

В експерименті збудження від локальної точки поширюється далі в обох напрямках. У реальних умовах проведення нервових імпульсів здійснюється в одному напрямку. Це пов'язано з тим, що ділянка, яка попрацювала, потребує відпочинку. А відпочинок нервової клітини, як нам відомо, активний і пов'язаний із затратами енергії. Збудження клітини є «втратою» її заряду. Саме тому, як тільки клітина попрацює, її здатність до збудження різко падає. Цей період називають рефрактерним, від французького слова *refractaire* – несприйнятність. Така несприйнятність може бути абсолютною (зразу ж після збудження) або відносною (в міру відновлення заряду мембрани), коли можливо викликати у відповідь реакцію, але з надзвичайно сильним подразником.

Як відомо, переважна маса головного мозку, за невеликим виключенням, сіро-білих відтінків. Тіла і короткі відростки нервових клітин – сірі, а довгі відростки – білі. Білі вони тому, що зверху на них є додаткова ізоляція у вигляді «жирових» або мієлінових подушок.

Звідки виникають ці подушки? Навколо нейрона існують особливі клітини, названі ім'ям німецького нейрофізіолога, який вперше їх описав, - шванівські клітини вони немов би няньки, допомагають нейрону рости і, зокрема, виділяють мієлін, який являє собою своєрідне «сало» або ліпід, яким бережно обгортають ділянки нейрона, що росте. Однак таке вбрання покриває не всю поверхню довгого відростка, а окремі ділянки, між якими аксон залишається голим. Дивно, але від того, як «одягнений» нервовий відросток, залежить швидкість проведення збудження. Легко здогадатися – спеціальна «форма одягу» існує для того, щоб збільшити ефективність проходження біоструму по нерву. Дійсно, якщо у сірих дендритах збудження рухається як черепаха (від 0,5 до 3 м/с), послідовно, не пропускаючи жодної ділянки, то у білому аксоні нервові імпульси скачуть по «оголеним» ділянкам Ранв'є, що суттєво збільшує швидкість їх проведення до 120 м/с. Такі швидкі нерви іннервують в основному м'язи, забезпечуючи захист організму. Внутрішні ж органи не мають потреби у такій швидкості. Наприклад, сечовий міхур може довго розтягуватися і посылати імпульси про своє переповнення, у той час як рука має відсмикнутися від вогню миттєво, інакше це загрожує пошкодженням.

Мозок дорослої людини у середньому вагою 1300 г. Цю масу складає  $10^{10}$  нервових клітин. Така величезна кількість нейронів! З допомогою яких механізмів збудження з однієї клітини потрапляє на іншу?

Розгадка таємниці комунікації у нервовій системі має свою історію. У середині XIX ст. французький фізіолог Клод Бернар отримав цінну посилку із Південної Америки з отрутою кураре, тією самою, якою індіанці намащували наконечники стріл. Учений захопився вивченням дії отрути на організм. Було відомо, що тварина, уражена такою отрутою, помирає від задухи внаслідок паралічу дихальних м'язів, але ніхто не знав, як саме діє блискавичний вбивця. Для того щоб це зрозуміти, Бернар проробив простий дослід. Він розчинив отруту у чашці Петрі і, помістивши туди м'яз з нервом, побачив, що якщо в отруту помістити лише нерв, то м'яз залишається здоровим і як раніше може працювати. Якщо ж отруїти лише м'яз, то і у цьому випадку зберігається його здатність до скорочення. І лише тоді, коли в отруту помістили ділянку між нервом і м'язом, можна було спостерігати типову картину отруєння: м'яз ставав нездатним скорочуватися навіть при дуже сильних електричних впливах. Стало очевидним, що між нервом і м'язом існує «розрив», на який діє отрута.

З'ясувалось, подібні «розриви» можна знайти у будь-якій точці організму, вся нейронна мережа буквально ними пронизана. Були знайдені й інші речовини, наприклад, нікотин, котрий вибірково діяв на загадкові місця між нервом і м'язом, викликаючи їх скорочення. Спочатку ці невидимі зв'язки називали міоневральним з'єднанням, а згодом англійський нейрофізіолог Чарльз Шеррінгтон дав їм назву синапсів, від латинського слова *synapsis* – з'єднання, зв'язок. Проте жирну крапку у цій історії поставив австрійський фармаколог Отто Леві, котрому вдалося знайти посередника між нервом і м'язом. Він взяв два серця і виокремив на одному з них найкрупніший нерв – *pervus vagus*. Попередньо передбачаючи, що з нього має щось виділитися, він з'єднав системою трубочок ці два «м'язових мотора» і став подразнювати нерв. Леві знав – при його подразненні серце зупиняється. Проте зупинялось не тільки те серце, на яке діяв подразнений нерв, але й друге, з'єднане з ним розчином. Дещо пізніше Леві вдалось у чистому вигляді виділити цю речовину, яка отримала назву «ацетилхолін». Таким чином був знайдений незаперечний доказ наявності посередника у «розмові» між нервом і м'язом. Це відкриття було відзначено Нобелівською премією.

А далі все розгорталось набагато швидше. З'ясувалось, що відкритий Леві принцип спілкування нервів з м'язами універсальний. З допомогою такої системи спілкуються не лише нерви і м'язи, але й самі нерви між собою. Однак, не дивлячись на той факт, що принцип такої комунікації один, посередники, або, як згодом їх стали означати, медіатори (від латинського слова *mediator* – посередник), можуть бути різні. У кожного нерва він свій, як перепустка. Цю закономірність встановив англійський фармаколог Генрі Дейл, за що теж отримав Нобелівську премію. Отже, мова нейронного спілкування стала зрозумілою, залишилось лише побачити який вигляд має ця конструкція [15, с.21-22].

### **Як працює синапс?**

Якщо розглянути нейрон в електронний мікроскоп, то можна побачити, що він, немов би новорічна ялинка, весь завішаний якимись гудзиками. Таких

«гудзиків», або синапсів, лише на одному нейроні може бути до 10000. Подивимось уважніше на один з них. Що ми побачимо? На кінцевій ділянці нейрона довгий відросток потовщується, тому він нам здається у вигляді гудзика. У цьому потовщенні аксон як би стоншується і втрачає своє біле вбрання у вигляді мієліну. Всередині ж «гудзика» міститься величезна кількість пухирців, заповнених якоюсь речовиною. У 1954 році Джордж Паладе здогадався, що це є не що інше, як сховище для медіаторів (через 20 років за цю здогадку йому дали Нобелівську премію). Коли збудження доходить до кінцевої станції довгого відростка, то медіатори вивільняються зі свого полону. Для цього використовуються йони  $\text{Ca}^{2+}$ . Рухаючись до мембрани, вони зливаються з нею, потім лопаються (екзоцитоз), і медіатор під тиском потрапляє у середовище між двома нервовими клітинами, яке отримало назву синаптичної щілини. Вона досить мала, тому молекули медіатора швидко потрапляють на мембрану сусіднього нейрона, на котрій, у свою чергу, знаходяться особливі антени, або рецептори (від латинського слова *recipio* – брати, приймати), які уловлюють посередника. Відбувається це за принципом «ключ до замка» - геометрична форма рецептора повністю відповідає формі посередника, обмінявшись «рукостисканням», медіатор і рецептор змушені розлучитися. Зустріч досить коротка і остання для медіатора. Достатньо всього долі секунди, щоб медіатор запустив збудження на сусідньому нейроні, після чого він руйнується з допомогою спеціальних механізмів. А потім ця історія повториться ще і ще, і так до безкінечності буде бігти жива електрика по «нервовим проводам», ховаючи від нас безліч таємниць і тим самим притягуючи до себе своєю таємничністю [15, с. 23].

#### **Діяльність мозку людини**

Діяльність нашого мозку супроводжується генеруванням біотоків. Процеси збудження нервових клітин – це процеси електричні, вірніше, електрохімічні. Образно кажучи, нервові волокна виконують роль дротів, якими до мозку та від нього передаються електричні сигнали й накази. Якщо це так, то можна вважати, що робота мозку супроводжується електромагнітним випромінюванням – живий організм утворює навколо себе електромагнітне поле. Учені багаторазово перевіряли вплив магнітного поля на людський мозок. Наприклад, людину занурювали в гіпнотичний сон, навіювали їй певну картину-галюцинацію, а потім підносили до голови сильний магніт. Навіювана галюцинація зникала.

## Розділ 9. Використання змінного електричного поля високої частоти в медицині

Організм людини загалом можна розглядати як діелектрик, просочений розчином електроліту. Як відомо, будь-який діелектрик має великий електричний опір, а провідник – малий. У середовищах, що добре проводять електричний струм (м'язова тканина, кров тощо), внаслідок коливання заряджених частинок під дією ультрависокого поля виникає струм провідності. У тканинах, що є діелектриками (шкіра, жирова, нервова, кісткова тканина, сухожилля тощо), внаслідок обертання дипольних молекул в електричному полі ультрависокої частоти (УВЧ) виникає струм зміщення.

Теплова дія, тобто нагрівання тканини організму, переважно залежить від струму провідності. Для **ультрависокої частоти (УВЧ)** струм провідності переважає над струмом зміщення. Це допомагає проходженню енергії у глибші тканини.

Таким чином, під дією електричного поля ультрависокої частоти (УВЧ) у тканинах утворюється тепло не завдяки струму зміщення, а внаслідок проходження струму провідності, що мають великий опір, тобто погано проводять струм провідності. Найбільша кількість теплоти утворюється в шкірі, жировій та нервовій тканинах, сухожиллях.

Дія електричного поля ультрависокої частоти (УВЧ) на тканини спричиняє виникнення як теплового ефекту, так і коливального. Причому коливальний чинник має більше значення, тому електричне поле ультрависокої частоти (УВЧ) застосовують не лише у звичайному тепловому дозуванні, а й у слабко тепловому, а також у дозуванні без відчуття теплоти.

Теплову та коливальну дію електричного поля **ультрависокої частоти (УВЧ)** на біологічні об'єкти не можна протиставляти, оскільки вони нероздільні між собою. Електричне поле УВЧ виявляє свої властивості в усіх тканинах організму, але різною мірою, що залежить від електричних властивостей тканини. Що менша електрична провідність тканини, то більшою мірою виявляється теплова дія струму.

Внаслідок теплової та коливальної дії спостерігаються фізико-хімічні зсуви на клітинному і молекулярному рівнях.

Існують такі види методів лікування організму людини за допомогою змінного електричного поля **ультрависокої частоти**:

**УВЧ-терапія** – метод електролікування, що полягає в дії неперервним електричним полем УВЧ. Діапазон коливань такого поля становить 30-300 МГц, що відповідає довжині хвилі від 10 до 1 м.

**Імпульсна УВЧ-терапія** – метод електролікування, що полягає в дії електричного поля УВЧ у вигляді серії потужних коротких імпульсів. Частота імпульсів електричного поля УВЧ становить 500 МГц, тривалість імпульсу – 2 мкс, тривалість паузи між імпульсами в 500 – 1000 разів перевищує тривалість імпульсу. Це дає змогу швидко збільшувати потужність імпульсів такого поля. Водночас майже цілком унеможлиблюється теплоутворення всередині тканин.

Час проходження струму дуже малий, а проявляється переважно коливальна дія електричного поля УВЧ.

**НВЧ-терапія** – метод електролікування, що полягає в дії електромагнітного поля НВЧ. Інша назва – мікрохвильова терапія. При цьому використовують хвилі **сантиметрового (СМ-терапія) і дециметрового (ДЦ-терапія) діапазонів.**

**СМ-терапія** – метод електролікування, що полягає в дії концентрованою енергією електромагнітного поля частотою 2375 МГц, довжиною хвилі 12,6 см і потужністю 80 Вт. Дію мікрохвилями здійснюють у більшості випадків дистанційним методом, подаючи енергію електромагнітного поля до осередку ураження за допомогою електромагнітних випромінювачів різної форми та розмірів.

Біофізичний механізм перетворення в тканинах живого організму енергії хвиль СМ-діапазону у внутрішню енергію полягає у виникненні коливальних рухів електрично заряджених частинок – дипольних молекул, йонів. Енергія електромагнітного поля СМ-діапазону зумовлює в тканинах окрім теплового коливальний ефект, характерний для високочастотних коливань. При цьому змінюється колоїдна структура клітин, проникність біологічних мембран, відбувається зсув в електрично активних елементах клітин. Еритроцити орієнтуються вздовж силових ліній електромагнітного поля. Виникають резонансні явища коливань у молекулах білка, амінокислот і пептидів, близьких за своїми частотними характеристиками до діапазону СМ-хвиль. Сильніше за інших нагріваються тканини з підвищеним вмістом води – паренхіматозні органи, кров, лімфа, м'язи.

Водночас енергія електромагнітних хвиль СМ-діапазону глибше проникає в ті структури тіла, якими вона поглинається. Це переважно тканини з малим вмістом води – шкіра, кістки, суглоби. Істотно поглинаються хвилі СМ-діапазону поверхневими тканинами, тому глибина їх проникнення обмежується 3-6 см.

Мікрохвилі можна сфокусувати або спрямувати паралельними пучками. Вони можуть заломлюватися, відбиватися, інтерферувати.

Основною відмінністю СМ-терапії від УВЧ-терапії є те, що на межі тканин із різною електропровідністю, наприклад, у підшкірній клітковині, виникає загроза суттєвого перегрівання у цій ділянці, утруднюється подальше поширення енергії вглиб тканини. Це є недоліком мікрохвильової терапії.

**ДМ-терапія** – метод електролікування, що полягає в дії концентрованою енергією електромагнітного поля частотою 461,5 МГц, довжиною хвилі 65 см і потужністю 100 Вт. Енергію електромагнітного поля підводять до хворого і фіксують над ураженою ділянкою тіла за допомогою випромінювача, що може бути різної форми.

Лікарі віддають перевагу ДМ-терапії. Оскільки організм людини краще сприймає і легше переносить ДМ-хвилі, тому що адаптований до хвиль цього діапазону: вони є у спектрі сонячних променів космічного випромінювання. Механізм дії енергії електромагнітного поля ДМ-діапазону багато в чому

подібний до механізму дії СМ-терапії. Однак ДМ-хвилі поглинаються тканинами організму більш рівномірно, нагрівання шкіри і підшкірної клітковини є меншим, ніж під час поглинання СМ-хвиль. Це пояснюється порівняно рівномірним розподілом енергії на межі двох тканин з різними діелектричними властивостями і більшою довжиною хвиль. ДМ-хвилі поглинаються тканинами досить рівномірно, тому не відбувається перегрівання поверхневих тканин. Межа нетеплової дії ДМ-хвиль істотно вища, ніж у разі СМ-терапії.

Глибина проникнення ДМ-хвиль у тканини залежить від умісту в них води і в середньому становить 8-10 см. Добре поглинається енергія мікрохвиль органами і тканинами з підвищеним кровопостачанням – паренхіматозними органами та м'язами. Енергія ДМ-хвиль створює тепловий і коливальний ефекти. У тканинах з підвищеним умістом води тепловий ефект вищий у перші 10-15 хв. від початку процедури, температура ділянки тіла, на яку потрапляють ДМ-хвилі, підвищується на 4-6°C, у ділянці впливу хвиль посилюється рух крові. Потім температура знижується на 1-2°C і в подальшому її підвищення не спостерігається. Під впливом ДМ-терапії знижується проникність клітинних мембран, прискорюються процеси обміну речовин [17, с. 27-28].

#### **Значення фундаментальних відкриттів у галузі електрофізіології.**

Чи потрібно говорити про значимість відкриттів в області електрофізіології? Достатньо сказати, що за відкриття зависи у світ живої електрики присуджено сім Нобелівських премій. Сьогодні лєвова частка фармацевтичної промисловості побудована на цих фундаментальних відкриттях. Наприклад, на цей час похід до дантиста не таке вже страшне випробування. Один укол лідокаїну і у місці ін'єкції  $\text{Na}^+$ - канали тимчасово заблокуються. І ви вже не відчуєте болю від процедур. У вас з'явилися болі в животі і лікар призначить лікарські препарати (ношпа, папаверин, платифілін), в основі дії яких – блокада рецепторів, щоб з ними не міг зв'язатися медіатор ацетилхолін, який запускає багато процесів у шлунково-кишковому тракті. Останнім часом активно розвивається серія фармакологічних препаратів центральної дії, спрямованих на покращення пам'яті, мовної функції і мислительної діяльності.

## **Розділ. 10. Пізнавальні й творчі задачі та компетентісно орієнтовані завдання**

### **Пізнавальні задачі**

**1. Ця маленька тварина допомогла людині зробити багато важливих відкриттів. Назвіть цю тварину. До яких відкриттів вона причетна? У яких містах було споруджено перші пам'ятники цим тваринам?**

*Відповідь.* Це – жаба. Саме жаби майже 200 років тому дали поштовх розвитку науки про електрику й забезпечили перші, боязкі кроки учених на шляху до розкриття її таємниць. Ця тваринка причетна до багатьох відкриттів. Так, наприкінці 18 ст. знамениті учені Луїджі Гальвані і Алессандро Вольта виявили електрику у тварин. А допомогли їм зробити це важливе відкриття досліди з жабами. Лапка жаби тривалий час була єдиним електровимірювальним приладом фізиків. Фізіолог І.М. Сеченов, вивчаючи роботу мозку, багато дослідів проводив на жабах.

Перший пам'ятник жабам було споруджено в Паризькому університеті – Сорбонні – у ХІХ ст. Другий пам'ятник було споруджено в Токіо на гроші, що були зібрані студентами-медиками. Для своїх експериментів вони використали 100 тисяч жаб, на честь яких і було встановлено пам'ятник. Обидва пам'ятники – данина поваги і вдячності за неоціненні заслуги цих створінь для науки.

**2. Зграйні риби інколи утворюють величезні щільні косяки товщиною до 10 метрів і площею 15-20 квадратних кілометрів – це десятки мільйонів риб. При цьому косяк може вести себе як єдине ціле. Яким чином риби у косяку координують свої рухи?**

*Відповідь.* При вивченні поведінки риб учені виявили три простих правила, які наслідує кожна особина у косяку:

– кожна риба слідує тільки за ближніми сусідами. Цей зв'язок забезпечується зором – сліпа на одне око риба прилаштується до сусідів, які пливають з боку її ока, яким вона бачить;

– усі особини однаково зорієнтовані. Кожна риба створює навколо свого тіла електромагнітне поле. Риби, які пливають пліч-о-пліч, відчувають поля сусідів. Проте варто лише одній рибині у зграї проявити стурбованість і різко повернути, як усі інші миттєво роблять теж саме;

– їх притягує одне до одного, але вони витримують певну дистанцію. Риби у косяку тримаються дуже близько одне до одного – зазвичай відстань між ними дорівнює довжині їхнього тіла і навіть менше.

**3. У своїй подорожі Південною Америкою славетний натураліст Олександр Гумбольдт поставив собі за мету одержати живого електричного вугра, що мешкає в невеликому місцевому озерці, яке можна було перейти вброд. Доторкнутися до вугра неможливо – електричний удар у 300 В валить будь-яку людину (зазначимо, що вугри неодноразово примушували тікати кінноту іспанських конкістадорів, що переходили річки вброд). Жодних електроізолюючих пристосувань у членів експедиції**



**не було. Проблему раптом розв'язали місцеві індіанці, які не мали поняття про природу електрики. Що вони вчинили?**

**Відповідь.** До озера були зігнані дикі коні, що прийняли на себе розряди вугрів, після чого вугрі стали на деякий час «електробезпечними». Треба зазначити, що у повсякденному житті індіанці використовували коней як громовідводи під час переправ через річку, у якій мешкали вугрі.

**4. У чому суть періодичних електричних процесів, що відбуваються в нервовій та м'язовій системах хребетних?**

**Відповідь. М'язова система.** Періодичними процесами називають такі, у яких значення величин точно повторюються через різні проміжки часу. Одним з таких процесів є електричні коливання, які виникають у серці. Під час аналізу електрокардіограми (ЕКГ), тобто кривої, що відбиває електричну активність серця, видно, що у здорової людини через постійні інтервали виникають характерні стабільні конфігурації кривої. ЕКГ дає інформацію щодо ритму серця та його порушень. Водії ритму генерують електричні імпульси, що зумовлюють скорочення серця і характеризуються періодичними коливаннями мембранного потенціалу. Вони відбуваються автоматично в їх клітинах (наприклад, синоатрального вузла, який розташований у правому передсерді). Збудження кількох клітин цього вузла поширюється по всьому серцю його провідною системою, що призводить до серцевих скорочень. Властивість специфічних м'язових волокон – водіїв ритму, полягає в тому, що протягом часу між двома скороченнями в діастолі відбувається зменшення мембранного потенціалу до критичного рівня, після чого генерується потенціал дії, який поширюється по серцю і зумовлює його скорочення.

Періодичні електричні явища є і в гладеньких м'язах кишок. Вони й становлять основу міогенної автоматії

Міогенне збудження виникає в певних клітинах та поширюється у вигляді потенціалів дії, які зумовлюють скорочення клітин гладеньких м'язів кишок. Зміни міогенного тону тривалістю кілька секунд або хвилин (наприклад, маятникоподібні рухи тонкої кишки) обумовлені змінами активності міогенних водіїв ритму в кишках.

**Нервова система.** Періодичні електричні явища можна зареєструвати на поверхні голови людини у вигляді електроенцефалограми (ЕЕГ), яка залежить від діяльності мозку. Водії ритму ЕЕГ розташовані в стовбурі головного мозку, нейронах ядер таламуса, які автоматично генерують потенціали дії з певною частотою. В основі цих періодичних розрядів лежать коливання мембранного потенціалу нейронів таламуса. У час спокою людини ці водії ритму розряджаються синхронно з частотою 10 с, що зумовлює збудження кіркових нейронів. На поверхні голови реєструється так званий  $\alpha$ -ритм з частотою 8-13 Гц (в середньому 10 Гц), амплітудою 50-100 мкВ. Під час збудження синхронність розрядів водіїв ритму порушується, що відбивається в кірковій речовині у вигляді електричних коливань (в – хвилі) з більшою частотою та

меншою амплітудою (20 Гц, 10-15 мкВ). Це явище називають десинхронізацією ЕЕГ, або блокадою а-ритму.

Періодичні електричні явища можна зареєструвати в задньому мозку над дихальним центром (навіть після перерізування всіх нервових стовбурів, що йдуть до нього), а також за певних умов в ізольованому спинному мозку. Ці ритмічні явища лежать в основі автоматичної роботи дихального центра та локомоторної активності спинного мозку відповідно і мають відповідні параметри.

### **5. Яким чином відбувається передача нервового імпульсу з клітини на клітину? Які особливості будови електричного синапсу на відміну від хімічних синапсів?**

*Відповідь.* Кожний нейрон, на мембрані якого виник потенціал дії передає імпульс або на інший нейрон, або на м'язову клітину, або на секреторну клітину. Передача електричного імпульсу відбувається через спеціальні структури міжклітинних контактів – синапси.

Хімічним, або пухирцевим, синапсам властива широка синаптична щілина (20-50 нм), яка відокремлює пресинаптичну мембрану і ущільнення від постсинаптичних. Збудження і гальмівні впливи передаються в цих синапсах в одному напрямку за допомогою спеціальних хімічних речовин – медіаторів.

У електричних, або безпухирцевих, синапсах зовнішні шари мембрани контактуючих клітин розділені простором завширшки 2 нм, вони функціонують за рахунок йонного струму. Дуже вузька щілина з низьким електричним опором дає змогу потенціалу дії (ПД) без перешкод поширюватися на постсинаптичну мембрану і у зворотному напрямку. У стовбурі мозку ссавців є три ділянки з електричними синапсами, які дають змогу синхронізувати активність груп нейронів та отримувати стереотипні реакції при багаторазових впливах, оскільки вони стійкіші, ніж хімічні синапси.

Нексуси, або щільні контакти, характеризуються майже повним злиттям зовнішніх шарів мембран контактуючих клітин і значним стоншенням спільної ділянки мембрани обох клітин. Нексусам властивий низький опір і висока двобічна проникність для йонів. Вони здійснюють міжклітинну передачу збудження в серцевому м'язі та гладкій мускулатурі.

Залежно від того, між якими частинами утворений синапс, його називають аксодендритним, аксосоматичним і аксоаксонним. У ядрах таламуса виявлено денродендритні, дендросоматичні та соматосоматичні синапси [12, с.137].

**6. 1959 року британський хімік Джон Кендрю з'ясував структуру м'язового білка міоглобіну й через три роки одержав за це відкриття Нобелівську премію. Минуло півроку, але цей білок лишається предметом активного вивчення й відкриває часом несподівані секрети. Так, біологи з Великобританії, США й Канади дослідили особливості міоглобіну у китоподібних, а також їм вдалось з'ясувати і те, скільки часу проводили під водою предки деяких сучасних ссавців.**

**Які особливості білка міоглобіну у китоподібних та інших водних тварин – моржів, тюленів, бобрів, ондатр дозволяють їм тривалий час перебувати під водою?**

**Відповідь.** Міоглобін – білок, що зв'язує кисень. Його можна знайти в м'язах усіх ссавців. Білок надає м'язам червоного кольору за рахунок заліза, яке міститься в ньому.

У водних тварин у цілому більше міоглобіну, ніж у наземних. У кашалота, наприклад, концентрація цього білка в м'язах одна з найвищих. Крім того, там міститься дуже багато кисню, і тому тварина може по півтори години не виринати на поверхню.

Як показало нове дослідження, не тільки завдяки величезній кількості гемоглобіну водні ссавці можуть тривалий час перебувати під водою. Справа ще й у тому, що поверхні цих білків несуть у цих тварин надлишковий позитивний заряд, через який молекули відштовхуються одна від одної. Це забезпечує не злипання міоглобіну в настільки величезних концентраціях – в іншому випадку він би перетворювався на нефункціональні білкові маси.

Добре заряджені міоглобіни є у м'язах багатьох водних тварин – тюленів, моржів, бобрів, ондатр. У тварин, які менше часу проводять у воді (наприклад, у болотної бурозубки й кротів-зіркорилів), міоглобіни несуть менший заряд, ніж у водних, але однаково більший, ніж у повністю наземних ссавців. Високогірні й підземні види, за ідеєю, теж мають потребу в кисні, однак у їхніх міоглобінів немає такого високого заряду, як у нирців. Таким чином, позитивно заряджений міоглобін може бути індикатором водного способу життя.

### **Пізнавальні задачі для самостійного розв'язку**

1. Одним із головних шляхів передачі інформації між клітинами є використання сигнальних молекул. Але, не виключено, що, крім хімічної взаємодії клітини обмінюються інформацією і за допомогою електромагнітних хвиль. Чи можливий обмін інформації між клітинами тварин за допомогою електромагнітних хвиль? Відповідь аргументуйте.

2. Дослідниками було встановлено, що листки герані реагують імпульсами електропровідності на руйнування власних тканин, на знищення живих безхребетних та культур тканин, якщо це здійснюється у безпосередній близькості до рослин. Запропонуйте гіпотезу, яка пояснює цей феномен.

### **Творчі задачі**

1. **Гніздо блискавок.** Серед людей поширена думка, що є такі місця, куди блискавки попадають постійно. Існує навіть народний термін – «гніздо блискавок». Як не дивно зовні такі місця нічим особливим не відрізняються – рівний, без підвищень ґрунт, немає високих поодиноких дерев, водоймищ поблизу таких місць теж немає. Дослідники зацікавились: що ж може бути причиною існування гнізд блискавок? Чи можливе таке явище взагалі, чи не є це міфом? Чи не протирічить воно законам фізики? Спробуйте розібратися у цьому явищі і знайти його причини.

**Відповідь.** Блискавки попадають у ті місця, де електричний супротив знижено. Це можливо, якщо у землі приховане водне джерело або поклади металу. Законам фізики це явище не протирічить – електричний супротив таких місць дійсно знижено.

**Подумайте.** Чому нижній кінець громовідводу рекомендують закопувати якомога глибше?

**Відповідь.** Вода є кращим провідником, ніж земля. Наявність вологи у землі зменшує електричний супротив і полегшує проходження розряду блискавки у землю. Саме тому нижній кінець громовідводу треба закопувати глибше, де завжди є волога.

**Цікавий факт.** На нашій планеті безперервно виникають блискавки – сотня блискавок проникає у землю кожну секунду. Потужність блискавок досягає інколи 200 тисяч ампер, а потенційна напруга великої грози може бути у п'ять разів більше атомної бомби, скинутої на Хіросіму. Температура каналу може перевищувати температуру на поверхні Сонця. В разі ударів блискавки у піщаний ґрунт утворюються неправильної форми шматки розплавленого кварцу (піску) – температура при цьому досягає 30 тисяч градусів [8, с. 161].

**2. Гроза у пластмасовому відрі.** Дві господині поверталися додому після доїння корів. Одна несла молоко у металічному відрі, а інша – у пластмасовому. У полі їх застала гроза, яку їм довелося перечекати у хащах кущів. Дома господиня пластмасового відра виявила, що молоко у відрі згорнулося. Вона ще більше здивувалась, коли довідалась, що у її сусідки молоко у металічному відрі було свіжим, як зазвичай. Як це можна пояснити?

**Відповідь.** Молоко – це типовий колоїд, і при опроміненні його електромагнітним випромінюванням, що відбувається під час грози, воно згортається, при цьому розкладаючись на складові. У даному випадку металічне відро екранувало електромагнітне випромінювання, і ефект випромінювання був відсутнім.

**Подумайте.** Більшість дорослих мешканців Азії, аборигени Америки, Австралії, Центральної Африки і Арктичної зони не можуть пити цільне молоко – не сприймає організм. Новонароджені ссуть грудне молоко, але у дорослих молоко викликає нудоту, пронос. Сметану, сир та інші кисломолочні вони можуть вживати, а молоко – ні. **Як ви думаєте, чому?** [8, с. 98].

## **Компетентнісно орієнтовані завдання** **Властивості клітинної мембрани**

**1.1. Мембранний потенціал спокою.** Загальновідомо, що для підтримки діяльності будь-якої біологічної системи потрібен постійний зв'язок із зовнішнім середовищем, завдяки якому підтримується сталість системи. Будь-яка жива клітина має таку властивість, як подразливість, тобто здатність під впливом сигналів із оточуючого середовища переходити від стану фізіологічного спокою до стану певної активності. В організмах багатоклітинних тварин наявні високоспеціалізовані клітини – нервові, м'язові,

секреторні, які здатні до збудження – найбільшої активності у відповідь на подразливість.

Клітина здатна сприймати сигнал лише у тому випадку, якщо її мембрана електрично поляризована, тобто має заряд, який отримав назву мембранний потенціал спокою (МПС).

*Завдяки чому ж виникає різниця потенціалів між зовнішньою і внутрішньою поверхнями клітинної мембрани?*

**Відповідь.** Основна причина – це особлива будова клітинної мембрани. Мембрану клітини пронизують численні канали та насоси, які складаються з білкових молекул. Більшість каналів вибірково проникні для «своїх» йонів. Так, розрізняють окремі канали для йонів калію, натрію, хлору, кальцію тощо, а також так звані канали витоку, які неспеціалізовані для окремих йонів і весь час відкриті (проте, каналів витоку дуже мало). У стані фізіологічного спокою із спеціалізованих каналів відкриті тільки калієві. Через ці канали  $K^+$  виходить з клітини, але цей вихід незначний, оскільки на зовнішньому боці мембрани завжди багато  $Na^+$ . Позитивний заряд, який створює  $Na^+$ , заважає витоку  $K^+$ . Йони натрію, в свою чергу, накопичуються поза клітиною тому, що спеціалізовані натрієві канали у стані спокою зачинені. Таким чином, зовнішня поверхня мембрани заряджена позитивно. Водночас, великі аніони, які утворюються під час клітинного метаболізму, не можуть проникнути крізь канали, створюючи негативний заряд всередині клітини. Так виникає трансмембранна різниця потенціалів – мембранний потенціал спокою (МПС).

Проте МПС постійно порушується завдяки пересуванню йонів  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$  крізь канали витоку, та  $K^+$ , який проходить через відкриті спеціалізовані канали. Врівноваження МПС залежить від роботи так званих натрій-калієвих насосів, які переміщують  $Na^+$  на зовнішню поверхню мембрани, а  $K^+$  - у середину клітини, тобто проти їх градієнта. Тому насоси під час роботи споживають енергію АТФ. Для функціонування насоса, до нього мають прикріпитися 3 йона  $Na^+$  зсередини та 2 йона  $K^+$  зовні.

У формуванні МПС натрій-калієві насоси виконують функцію підтримки трансмембранного градієнту концентрацій  $Na^+$  і  $K^+$  та генерують невелику різницю потенціалів, яка додається до потенціалу, що створюється дифузиею  $K^+$  за концентраційним градієнтом [12, с.127].

**1.2. Роль мембранного потенціалу спокою у клітині. Яку роль у клітині відіграє мембранний потенціал спокою?**

**Відповідь.** Мембранний потенціал спокою, по-перше, забезпечує можливість сприйняття сигналів, а, по-друге, сприяє транспортуванню деяких речовин. Що стосується транспортної функції МПС, то механізм її здійснення такий: йони натрію постійно прагнуть проникнути в клітину за законом дифузії. Оскільки існує великий градієнт. До йонів  $Na^+$  причіплюються невеликі молекули (глюкози, амінокислоти), які разом з йонами  $Na^+$  потрапляють у клітину.

Сприйняття сигналів може відбуватися на двох рівнях. Якщо клітина не має великої кількості натрієвих або калієвих каналів, то дія будь-якого подразника викликає переміщення в клітину йонів, які спричинюють зміну обмінних хімічних процесів в цій клітині. Це явище носить назву подразнення.

Якщо клітина має дуже велику кількість каналів, то вона здатна до збудливості. У такому випадку сигнали, якщо вони сягають певного порогу, викликають потенціал дії (ПД). Так називають різке коливання різниці потенціалів. В основі ПД клітини лежать зміни йонної провідності мембрани [12, с.128].

**1.3. Процес генерації потенціалу дії.** *Поясніть механізм генерації потенціалу дії у клітині.*

**Відповідь.** Механізм генерації потенціалу дії такий: у момент подразнення проникність мембрани для  $\text{Na}^+$  зростає, і  $\text{Na}^+$  починає надходити в клітину. Знижуючи внутрішній негативний заряд мембрани, тобто виникає деполяризація клітинної мембрани. При досягненні мембраною певного – критичного – рівня деполяризації виникає лавиноподібний потік  $\text{Na}^+$  всередину клітини, що зумовлює появу висхідного коліна ПД. У цей момент електрична провідність мембрани для  $\text{Na}^+$  зростає у 100 разів порівняно зі станом спокою і стає у 20 разів більше за провідність для  $\text{K}^+$ . І якщо ця величина для  $\text{Na}^+$  збільшується далі, то заряд мембрани в місці подразнення змінюється – виникає реверсія знаку МП. Проте під час збудження позитивне значення ПД не може бути більшим за натрієвий рівноважний потенціал (потенціал, за якого концентраційний та електричний градієнти для певного йона зрівноважені), який становить +65 мВ.

Існує принаймні дві причини цього явища:

1) підвищення електричної проникності для йонів натрію не триває довго; її значення починає різко падати, коли досягнуто піка ПД (протягом 1 мс), тому мембрана не встигає перезарядитися до +65 мВ;

2) у той самий час, приблизно в межах 1 мс після початку збудження, відбувається повільніше зростання електричної проникності мембрани для йонів  $\text{K}^+$ , що зумовлює фазу реполяризації мембрани.

Натрієва провідність досягає максимуму менше ніж за 1 мс після початку ПД, а потім різко знижується, зникаючи зовсім протягом 0,5 мс, хоча деполяризація мембрани ще зберігається. Це явище називають натрієвою інактивацією, яка існує доти, доки триває деполяризація мембрани. Натрієва активаційна система відновлюється, коли МПС повертається до початкового рівня або навіть за певної гіперполяризації мембрани. Калієва провідність, на відміну від натрієвої, не активується і навіть зростає доти, доки існує деполяризація мембрани.

Наслідки потенціалу дії у різних збудливих тканинах: потенціал дії виникає в клітинах збудливих тканин – нервових, м'язових, секреторних. У нервових клітинах потенціал дії викликає проведення збудження нервовими

волокнами, у м'язових – скорочення; в секреторних клітинах ПД дає старт секреторним процесам [12, с.129].

**1.4. Проведення збудження.** *Поясніть механізм проведення збудження за допомогою локальних колових струмів від незбудженої до збудженої ділянки по немієлінізованому і мієлінізованому нервових волокнах.*

**Відповідь.** Проведення збудження вздовж нервових волокон здійснюється за допомогою місцевих (локальних) струмів, які виникають між збудженою (деполяризованою) і нормально поляризованою ділянками волокна. Поширення локальних струмів уздовж волокна визначається його кабельними властивостями, а напрямок струму такий, що він викликає деполяризацію сусідньої зі збудженою ділянкою мембрани. Деполяризація швидко досягає порогового значення і генерує ПД, який, у свою чергу, активує наступну ділянку волокна. Завдяки такому естафетному механізму збудження поширюється вздовж усього волокна. Причому в немієлінізованих і м'язових волокнах збудження безперервно переходить від однієї точки клітинної мембрани до іншої.

Якщо нервовий імпульс проводиться за рахунок локальних колових струмів, то вирішальне значення повинні мати пасивні електричні властивості мембрани. Тому швидкість проведення збудження має бути тим більшою, чим далі щоразу поширюється потенціал і чим швидше він зростає у кожній точці волокна.

У немієлінізованих волокнах швидкість поширення потенціалу дії залежить і від опору аксоплазми аксона. Цей опір, у свою чергу, зумовлений діаметром волокна: чим менший діаметр, тим більший опір. У тонких аксонах великий опір аксоплазми негативно впливає на електричну провідність і зменшує довжину локального ланцюга, до якого входить тільки та ділянка, що розміщена безпосередньо попереду від ПД. Тому швидкість поширення збудження у тонких волокнах найменша (до 0,5 м/с).

У хребетних збільшення швидкості проведення збудження відбувається за рахунок покриття волокон мієліновою оболонкою. Мієлінова оболонка нервового волокна має високий питомий опір ( $500-800 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ) і виконує роль ізолятора, який переривається через кожні 1-2 мм вузлами нервового волокна (перетяжками Ранв'є) – це запобігає втраті струму між ними. Завдяки цим властивостям локальні струми від збудженого вузла не входять у ділянки між вузлами, а деполяризують наступний вузол. При цьому ПД (потенціали дії) виникають тільки у вузлах нервового волокна. Такий механізм поширення збудження називають стрибкоподібним, або сальтаторним. Він економічніший, надійніший (збудження може перестрибнути через 1-2 вузли), швидший, тобто загалом має вищий чинник надійності [12, с. 130-131].

**1.5. Транспорт речовин через мембрану.** Плазмалема оточує клітину з усіх боків. Обмін речовин між клітинами та міжклітинною речовиною забезпечується кількома способами транспорту.

Переміщення речовин ( $O_2$ ,  $CO_2$ ), що не потребує енергії, називається дифузією.

Окремі малі органічні молекули (глюкоза, деякі амінокислоти тощо) також проходять через мембрани у напрямку меншої концентрації цих речовин, але даний процес відбувається швидше простої дифузії. Тому він називається полегшеною дифузією. Полегшена дифузія здійснюється білками-переносниками. Переносники зв'язують молекули з одного боку мембрани, а вивільняють – з іншого.

Йони та великі молекули, для яких мембрани є непроникними, переносяться з витратами енергії активним транспортом. Завдяки йому молекули можуть переміщатися навіть із ділянки меншої концентрації до ділянки більшої [2].

Ще в середині XIX ст. Е. Дюбуа Раймонд і Р. Медучі виявили існування електричного потенціалу клітини. Вони зареєстрували так звані струми ушкодження, які виникають між ушкодженими та неушкодженими ділянками м'яза. Напрямок такого струму свідчить про те, що цитоплазма клітини заряджена негативно щодо зовнішнього середовища. Тоді ще не було відомо, чи є електричний потенціал у неушкодженій клітині, чи він виникає тільки внаслідок її ушкодження [2].

*Поясніть механізм вимірювання у клітинах різниці потенціалів по обидва боки мембрани.*

**Відповідь.** Різницю потенціалів можна виміряти у такий спосіб: до клітин, вміщених у фізіологічний розчин, підводять два електроди і вимірюють вольтметром різницю потенціалів між ними. Певна річ, що поки обидва електроди знаходяться у фізіологічному розчині, різниця потенціалів дорівнює нулю. Якщо ж один з електродів занурити у клітину, реєструватиметься електричний потенціал. Зокрема, для нервових клітин він дорівнюватиме приблизно – 80 мВ. Цей потенціал називають мембранним потенціалом спокою. Він зумовлений розподілом іонів  $Na^+$  і  $K^+$  по різних боках мембрани.

Йони  $Na^+$  концентруються на зовнішньому її боці, а йони  $K^+$  - всередині клітини. У клітинні мембрани вбудовані численні йонні канали, які мають вибіркову проникність. Так,  $Na^+$  - канал у нормі пропускає тільки іони  $Na^+$ , а  $K^+$  - канал – тільки іони  $K^+$ . При цьому більшість часу мембрана буває непроникною для іонів  $Na^+$ , тому що  $Na^+$ - канали знаходяться у закритому стані.

Йони  $K^+$  здатні дифундувати назовні, і, здавалось б, можна очікувати, що через деякий час концентрації іонів всередині і ззовні клітини зрівняються і потенціал спокою впаде до нуля. Проте цього не відбувається, бо стабільність різниці концентрацій підтримується шляхом активного транспорту іонів. Одним з основних механізмів підтримання сталої концентрації є робота  $Na^+ / K^+$  - насоса. Це білок, який при використанні однієї молекули АТФ переносить у клітину два йона  $Na^+$ , і виносить із неї три йона  $K^+$ . На підтримання стабільного мембранного потенціалу клітина витрачає від 30 до 70% вироблюваної енергії [2].



**1.6. Транспорт симпорт і антипорт.** Водночас з іоном  $\text{Na}^+$  у клітину може входити молекула глюкози. Такий транспорт здобув назву симпорта. Коли ж в обмін на три йона  $\text{Na}^+$ , що входять у клітину, з неї виходить один йон  $\text{Ca}^{2+}$ , такий транспорт називається антипортом. Зміни мембранних потенціал залежних білків, наприклад, -  $\text{Ca}^{2+}$ -каналів, що регулюють кількість  $\text{Ca}^{2+}$  в цитозолі.

*Що є прямим наслідком існування мембранного потенціалу?*

**Відповідь.** Прямим наслідком існування мембранного потенціалу є здатність деяких клітин до генерації збудження, що спричиняє виникнення потенціалу дії. До клітин, у яких може виникати збудження, належать нервові, м'язові, деякі секреторні тощо. Потенціалом дії називається мембранний потенціал, що зазнає швидких змін. При таких змінах негативний заряд цитоплазми змінюється на позитивний, тоді як заряд із зовнішнього боку мембрани стає негативним. Це зумовлено тим, що у відповідь на зовнішню дію  $\text{Na}^+$ - канали відкриваються і потік йонів  $\text{Na}^+$  прямує всередину клітини, а йони  $\text{K}^+$  виходять із неї. Виникнення потенціалу дії спричиняє швидку зміну заряду мембрани. Потім  $\text{Na}^+$ - канали закриваються, і поляризація мембрани швидко відновлюється. Саме такий механізм поширення збудження по відростках нервових клітин [2].

#### **Техногенні впливи на людину**

Людству знадобилися майже півстоліття й чорнобильська катастрофа, щоб усвідомити смертельну загрозу, яку приховує у собі радіація. Проте, на думку учених, не меншу небезпеку сьогодні становить техногенне іонізуюче випромінювання. І причина цього проста. Протягом тисячоліть люди жили у світі, де не було високочастотних електромагнітних випромінювань (ЕМВ). Усі органи та системи органів людини пристосувалися саме до таких умов. Для передачі інформації між окремими ділянками в живому організмі використовувалися сигнали, частота яких вимірюється в міліметровому діапазоні. Адже протягом мільйонів років в організмі не існувало природних випромінювань, а отже, не було й перешкод.

Звичайно, реакція живого організму на раніше не відоме йому випромінювання непередбачувана.

Першими стривожилися з цього приводу американці. Виявилось, що певна частина людей, які померли від раку мозку, активно користувалися радіотелефонами. За вивчення цієї проблеми взялися медики, фізики, хіміки. І не тільки в Америці.

Так, російський учений професор Ю. Григор'єв наголошував у своїх публічних виступах, що розглядаючи біологічні ефекти від електромагнітного поля, традиційно вважали – основним механізмом впливу є «теплове» ураження тканин. З огляду на це і розроблялися стандарти безпеки. Утім, останнім часом з'являється дедалі більше доказів існування інших шляхів взаємодії електромагнітного поля та живого організму при недостатній для теплового

впливу інтенсивності поля. Серед віддалених наслідків цих впливів – ракові, гормональні і багато інших захворювань.

**2.1. Вплив радіотелефонів.** Сучасні дослідники, ще до винайдення радіотелефонів, вивчали властивості різних тканин організму тварин. Ними було доведено можливість локального перегріву певних ділянок головного мозку, які завдяки високій провідності здатні поглинати значно більше енергії ЕМВ, ніж сусідні. І навіть при незначному переміщенні певних доз високочастотного випромінювання в мозку піддослідних тварин спостерігалися мікроскопічні ділянки, які ставали буквально спеченими. Тому, можливо, подібні впливи можуть спричинити рак мозку.

*Доведіть, що годинами спілкуватися за допомогою радіотелефону утворює шкідливо і прокоментуйте факт, що чим вищий рівень організації тварини, тим більше вона страждає від втрати або ушкодження певних структур власного організму.*

**Відповідь.** Люди – ссавці, теплокровні, як і тварини, яких маємо за піддослідних. Тому слід пригадати, як реагує мозок ссавців на втрату окремих ділянок, таких, які першими зустрінуть потік ЕМВ, - кори великих півкуль. Так, собаки, у яких видаляли кору великих півкуль, втрачали точність рухів, здатність обійти перешкоду, не впізнавали хазяїна, не реагували на ім'я, навіть не могли їсти самостійно, а тільки ковтали їжу, яку їм клали до рота. Примати після подібних операцій дуже швидко гинули. У них зникали набуті раніше індивідуальні реакції, свідомі рухи. Більшу частину доби вони спали.

Інколи подібні експерименти природа ставить над людьми. Так, новонароджені діти-аненцефали живуть лише кілька днів. Зовсім небагато часу потрібно, щоб зрозуміти: цей світ не для них – вони весь час сплять, не реагують на світло та звук.

**2.2.** Ще у 1994 р. в Європі розпочалося широкомасштабне дослідження можливих впливів радіотелефонів на здоров'я людей. Так, одна з дослідних груп проводила протягом місяця експеримент, під час якого 20 волонтерів 6 днів на тиждень протягом 2 годин на добу користувалися мобільними телефонами стільникового зв'язку. Лікарі ретельно спостерігали за їхнім здоров'ям та аналізували гормональний стан піддослідних.

Останні дані свідчать, що випромінювання переважної більшості мобільних телефонів значно перевищує гранично допустиму потужність електромагнітного випромінювання, яка становить 10 мВт на 1 см і не вважається шкідливою.

У результаті дослідження були одержані дані, що свідчать про те, що випромінювання стільникових телефонів негативно впливає на мозок, зокрема на гіпоталамус, а як результат цього – на ендокринну систему (стійке зниження рівня тиреотропного гормону), вестибулярний апарат та органи слуху, на сітківку ока.

*Спрогнозуйте подальший перебіг подій в організмі людини в разі нестачі вищезначеного гормону. Також сучасні дослідники висловлюють припущення про руйнівну дію випромінювання міліметрового діапазону (а саме цей діапазон використовують у радіотелефонах) на психіку людини. Що стало підставою для такого припущення?*

**Відповідь.** Так, дійсно неважко спрогнозувати подальший невтішний перебіг подій. При зниженні функції щитоподібної залози зменшується споживання кисню токсинами організму, уповільнюються процеси обміну речовин. Як результат – випадіння волосся, нездоровий колір та сухість шкіри, хрипкий голос. Також за нестачі утворення гормонів щитоподібної залози у дорослих людей може розвинутися мікседема (від грец. мікса – слиз і одема – пухлина, набряк). Вона супроводжується набряком шкіри і підшкірної клітковини, випадінням волосся, в'ялістю, сонливістю.

Вплив випромінювання міліметрового діапазону на психіку людини вивчав американський дослідник Марк Клівер. Так, у своєму дослідженні він проаналізував випадки «невмотивованих» актів суїциду серед благополучних громадян і з'ясував, що всі самогубці щоденно годинами розмовляли по радіотелефону. Це і дало Кліверові підстави для припущення, що саме радіотелефони, а точніше електромагнітне випромінювання могли стати причиною фатального кроку.

**2.3.** Сучасне покоління людей нероздільно пов'язане з мобільними радіотелефонами (МРТ). Серед користувачів мобільних телефонів – не тільки ділові люди, а й домогосподарки, студенти, школярі. Тому все частіше у медиків, учених, а останнім часом і в самих користувачів мобільних телефонів постає запитання: а чи безпечні мобільні телефони?

У 2012 р. на факультеті фізичного виховання одного із столичних вищих навчальних закладів серед студентів-першокурсників було проведено експериментальне дослідження щодо впливу електромагнітного випромінювання мобільних радіотелефонів на організм молодої людини (завдання дослідження: експериментально дослідити вплив ЕМВ (електромагнітне випромінювання) на фізіологічні показники – пульс і артеріальний тиск та встановити ризики мобільного зв'язку).

*Спрогнозуйте ризики мобільного зв'язку для здоров'я молодих людей, що пов'язані з надмірним використанням мобільних телефонів.*

**Відповідь.** Ризики можна вбачати в тому, що переважна більшість студентів використовує мобільні радіотелефони як будильник, тому під час сну тримають його біля ліжка або під подушкою, а це вже негативний вплив на здоров'я; під час навчання в університеті мобільний телефон у хлопців міститься переважно в кишені, що теж є ризиком для здоров'я; якщо протягом доби молоді люди здійснюватимуть понад 10 дзвінків по мобільному радіотелефону тривалістю в середньому до 5 хвилин, то більшість з них страждає на головний біль, який відчувається у скроневій частині голови.

2.4. Одержані протягом вище означеного експериментального дослідження дані підтвердили, що мобільний радіотелефон справді впливає на фізіологічний стан організму, зокрема на такі важливі показники, як пульс і артеріальний тиск. Простежується протилежна залежність між показниками «пульс» і «артеріальний тиск крові»: у студентів, у яких спостерігається зменшення артеріального тиску, відзначається збільшення пульсу і навпаки (збільшення артеріального тиску супроводжується зниженням пульсу).

*Чим пояснюється установлена дослідниками протилежна залежність між показниками «пульс» і «артеріальний тиск крові» у студентів?*

**Відповідь.** Протилежна залежність між цими показниками пояснюється компенсаторними фізіологічними механізмами, що виникають в організмі під дією електромагнітного випромінювання МРТ: а) ЕМ-випромінювання МРТ (мобільний радіотелефон) спричиняє теплове подразнення шкіри вушної раковини та прилеглої до неї ділянки голови; у шкірі під час теплового подразнення утворюється гістамін; гістамін розширює артеріоли і збільшує кровонаповнення капілярів, унаслідок чого спостерігається почервоніння шкіри у місці подразнення, артеріальний тиск починає знижуватися внаслідок зменшення притоку крові до серця; це так званий місцевий механізм регуляції кровообігу, що контролює кровоток через окремі органи і тканини (на противагу центрального механізму регуляції кровообігу, що його здійснюють гіпоталамус та судинно-руховий центр довгастого мозку); б) зниження артеріального тиску крові також спричиняє судинорозширювальна речовина – брадикінін, що активно починає утворюватися в підщелепній слинній залозі під дією ЕМ-випромінювання МРТ (мобільного радіотелефону); дія брадикініну подібна до дії гістаміну; в) у відповідь на зниження артеріального тиску в організмі для його нормалізації виникають рефлекторне прискорення й посилення скорочення серця; це явище характеризується прискореним биттям пульсу; г) у тих студентів, у яких відзначалося підвищення артеріального тиску, ймовірно виділялися судиннозвужувальні речовини – адреналін і норадреналін; ці речовини звужують артерії та артеріоли шкіри; судиннозвужувальний ефект цих речовин зумовлює різке підвищення артеріального тиску; д) у відповідь на підвищення артеріального тиску в організмі для його нормалізації рефлекторно зменшується кількість скорочень серця; це явище характеризується уповільненням пульсу [13, с.21].

Таким чином, вище означеним експериментальним дослідженням підтверджено, що під час використання МРТ (мобільного радіотелефону) в організмі молодшої людини нормальна фізіологічна залежність між серцевою діяльністю (пульсом) та артеріальним тиском крові розбалансовується. Проте організм намагається за допомогою компенсаторських механізмів відновити нормальну фізіологічну залежність між серцевою діяльністю (пульсом) та артеріальним тиском крові. Однак систематичне і довготривале використання мобільних радіотелефонів молодими людьми може призвести до порушення діяльності центральної нервової системи внаслідок порушення мозкового кровообігу. Це, в свою чергу, проявляється частим головним болем.

## Комп'ютер і здоров'я людини

**3.1.** На цей час питання про вплив електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на організм людини є досить складним, йому присвячені тисячі наукових статей. Результати досліджень свідчать про шкідливий вплив ЕМВ усіх діапазонів довжин хвиль на організм людини. І хоча сучасні монітори комп'ютерів з кінескопами, а тим більше рідиннокристалічні монітори, стали значно безпечнішими для здоров'я, ніж монітори десятирічної давнини, все ж небезпека від ЕМВ залишається.

*Що ж це за частотне ЕМВ і від яких складових комп'ютера воно виникає? До яких змін стану організму воно може призвести?*

**Відповідь.** Сучасні монітори з кінескопами, а тим більше рідиннокристалічні монітори, стали значно безпечнішими для здоров'я, ніж монітори десятирічної давнини. Однак в усіх випадках залишається низькочастотне електромагнітне випромінювання від електродвигунів, трансформаторів тощо, що не екранується і ефекти якого на сьогодні учені передбачити не можуть. Але вони застерігають, що в деяких випадках це низькочастотне електромагнітне випромінювання може призводити до таких змін стану організму, за яких він стає більш уразливим для шкідливих факторів іншої природи, наприклад, ксенобіотиків, вірусів тощо.

Наразі учені особливо ретельно вивчають вплив низькочастотних ЕМВ на здоров'я дітей через те, що організм дитини більш чутливий до всіляких факторів навколишнього середовища. Крім того, вплив цих факторів можливий віддаленими наслідками, які позначаються лише через багато років.

**3.2.** Сучасні дослідження учених свідчать, що захворювання органів дихання, які розвиваються через тривалу роботу на комп'ютері, мають, в основному, алергійний характер. Це пов'язано з тим, що під час тривалої роботи комп'ютера корпус монітора й плати в системному блоці нагріваються й виділяють у повітря шкідливі речовини, особливо, якщо комп'ютер новий.

*Поясніть, які ще фактори, що пов'язані з комп'ютером, згубно впливають як на легені, так і на весь організм людини в цілому?*

**Відповідь.** Одним із факторів, що згубно впливає не лише на легені, а й на весь організм в цілому є те, що комп'ютер створює навколо себе електростатичне поле, яке притягує пил. Разом з повітрям він потрапляє до легень. Крім того, працюючий комп'ютер дейонізує навколишнє середовище й зменшує вологість повітря. Отже, кожний із цих факторів негативно впливають на організм людини.

**3.3.** Ученими доведено, що на організм людини, крім мобільних телефонів, негативно впливає і тривале спілкування з персональним комп'ютером, як на користувача, так і на оточуючих його колег.

*Доведіть негативний вплив персональних комп'ютерів на організм користувача і того, хто знаходиться поруч.*

**Відповідь.** Так, дійсно, тривалий час роботи на персональному комп'ютері діє негативно не лише на користувача, а й на оточуючих його колег. Причина в тому, що ЕМВ (електромагнітне випромінювання) персональних комп'ютерів рівномірно розповсюджується навколо від монітора в радіусі від 1 м до 2,5 м, тому необхідно уникати цих небезпечних зон. Особливо небезпечний вплив ЕМВ міліметрового діапазону на ДНК людини, провокуючи при цьому мутації генів. Найбільше від ЕМВ міліметрового діапазону страждають люди, які схильні до алергії та люди з серцево-судинними захворюваннями. На цей час є дані про порушення ритму серцевих скорочень – аж до стану аритмії – при збігові частоти електромагнітних імпульсів із частотою серцевого циклу. Щодо алергіків, то у них може розвиватися гіперчутливість до електронних полів, унаслідок чого можливі кризові явища, під час грози або наближення до ліній електропередач, аж до непритомності.

### Єдність організму і довкілля

**4.1.** Для розвитку організму потрібна постійна взаємодія його з довкіллям та надходження певної інформації із середовища. Зокрема, для розвитку зорового аналізатора необхідна зорова інформація. Якщо дитина до трьох років не одержуватиме її достатньо, вона буде сліпою або матиме тяжкі порушення зору. Адже її нервова система не навчиться аналізувати зорову інформацію.

Таким чином, частини організму постійно обмінюються інформацією. Рецептори внутрішніх органів (інтерорецептори), а також сухожилок та м'язів (пропріорецептори) передають нервовій системі не менше інформації, ніж рецептори, що сприймають зміни довкілля (екстерорецептори). Кожна клітина передає інформацію за допомогою сигнальних молекул і приймає завдяки рецепторам. На плазмалемі однієї клітини розташовані сотні тисяч рецепторів.

Центральні системи регуляції в організмі людини та інших високоорганізованих тварин – це нервова, ендокринна й імунна системи. Саме вони передають інформацію в межах усього організму. Існують і місцеві системи регуляції, пов'язані з перенесенням речовин від клітини до клітини. Головні особливості систем регуляції організмів тварин відображено в таблиці «Порівняння деяких видів регуляції в організмі» [5, с. 230].

<i>Види регуляції</i>	<i>Механізм</i>	<i>Швидкість дії</i>	<i>Дальність дії</i>	<i>Клітини-мішені</i>
Міжклітинна передача речовин	Гуморальний (метаболіти, тканинні гормони)	Дорівнює швидкості дифузії	Міліметри, сантиметри	Навколишні клітини та тканини
Нервова	Електрофізіологічний, гуморальний (медіатори у синапсах)	Дуже велика (до 120 м/с)	У межах усього організму	Один нейрон може іннервувати сотні клітин і передавати сигнал через

				інші нейрони
Ендокринна	Гуморальний	Кілька хвилин	У межах усього організму	Клітини з відповідними рецепторами
Імунна	Гуморальний, клітинний	Від кількох хвилин до кількох діб	У межах усього організму	Більшість клітин організму

*Ознайомтесь зі змістом вище означеної таблиці і зробіть висновки щодо механізмів регуляції організму.*

**Відповідь.** Як видно з таблиці, функції організму регулюються двома механізмами взаємодії між клітинами: електрофізіологічним, пов'язаним із передачею електричного імпульсу, та гуморальним, що реалізується шляхом переносу розчинених хімічних речовин.

Нервова регуляція. Будь-яка клітина має мембранний електричний потенціал, що виникає через різницю концентрацій йонів по боках клітинної мембрани. Проте лише деякі клітини спеціалізовані на проведенні електричних сигналів.

Більшість багатоклітинних тварин мають нервову систему, побудовану з нейронів, які утворюють нейронні мережі. При збудженні рецепторів на мембрані нервової клітини виникає електричний імпульс, що проходить аксоном. Надалі інформація передається від однієї нервової клітини до іншої через синапс. Розрізняють електричні та хімічні синапси. В електричних синапсах (не дуже поширених у тварин) синаптична щілина вкрай мала, і електричний імпульс з великою швидкістю передається безпосередньо від клітини до клітини. Наприклад, грудні м'язи клиночеревок управляються саме через електричні синапси.

У хімічних синапсах передача інформації здійснюється гуморальним шляхом за допомогою нейромедіаторів. Коли електричний імпульс доходить до закінчення аксону, нейромедіатори виділяються з нього у синаптичну щілину та дістаються до мембрани іншої клітини. На мембрані, що приймає сигнал, медіатори зв'язуються з рецепторами і спричиняють виникнення електричного імпульсу або інші ефекти, внаслідок яких активуються чи пригнічуються процеси в клітині.

Отже, нервова регуляція відбувається шляхом розповсюдження нервових імпульсів по відростках нервових клітин.

**4.2.** Швидкість поширення електричного імпульсу залежить від особливостей будови нервового волокна, яким він проходить. Поясніть, як тварини використовують різні способи збільшення швидкості проведення нервового імпульсу.

**Відповідь.** У безхребетних тварин збільшення швидкості проведення нервового імпульсу досягається шляхом збільшення діаметра нервових відростків. Так, у кальмарів швидкість проведення імпульсу сягає 25 м/с.

Хребетні тварини підвищують швидкість проведення імпульсу завдяки мієліновим оболонкам аксонів. Мієлін виконує функцію ізолятора, і електричний імпульс мовби перескакує від однієї немієлінізованої ділянки до іншої. Швидкість проведення імпульсу мієлінізованим нервовим волокном хребетних - до 120 м/с.

**4.3.** Електрофізіологічну регуляцію роботи організму може здійснювати не тільки нервова система. Наведіть приклади інших видів електрофізіологічної регуляції в організмі.

**Відповідь.** По-перше, до передачі електричних імпульсів здатні неспеціалізовані клітини, з'єднані клітинними контактами. Наприклад, у серцевому і гладенькому м'язах нервові закінчення підходять лише до деяких клітин. Одержавши сигнал від нейрона, ці клітини передають його сусіднім через щілинні контакти. Так досягається синхронізація скорочення м'язових клітин.

По-друге, між різними частинами рослин існує різниця потенціалів, повільні зміни якої можуть впливати на метаболічну активність і ріст частин рослини. Крім того, за певних умов у всіх рослин виникають електричні потенціали, котрі поширюються і забезпечують рух чи взаємодію частин організму. Так, стимуляція верхівки пагону освітленням викликає імпульс, що прискорює поглинання мінеральних речовин у коренях. Швидкі рухи рослин пов'язані також із поширенням електричних імпульсів. Не виключено, що в електрофізіологічній регуляції у рослин вирішальну роль відіграють плазмодесми (тяжі цитоплазми, через які від клітини до клітини передаються йони). Проте цим шляхом передається лише вкрай обмежений обсяг інформації.

### **Сприйняття кольору оком людини з погляду фізики і біології**

**5.1.** Прагнучи запозичити у природи її барви, людина протягом усієї своєї історії шукала відповіді на найпростіші запитання: чому небо блакитне? Чому листя зелене?

Так, у VI ст. до н.е. послідовники школи Піфагора пояснювали видимість навколишніх предметів «зоровими променями», що виходять з ока людини. Протилежним був погляд Лукреція (I ст. н.е.), який пояснював видимість предметів безперервним витіканням з їх поверхні крихітних тіл, що утворюють тонкі плівки – «примари», які розлітаються в усіх напрямках. Ці «примари» штовхають повітря, що проходить крізь око, і, зачіпаючи зіницю, утворюють зорове сприйняття.

Треба зазначити, що всі ці теорії не ґрунтуються на дослідах. Вичерпна відповідь на поставлені вище запитання охоплює величезний обсяг людських знань, насамперед, з фізики, хімії та біології.

Ця відповідь пояснює такі аспекти: що таке видиме людським оком світло; як взаємодіє світло з предметом; як складається кольорове відчуття в людини? Може бути об'єктивне (з погляду фізики) і суб'єктивне (з погляду біології) пояснення кольору.



*Спробуйте відповісти на поставлені запитання з позиції фізики.*

**Відповідь.** Для правильного оцінювання явища зору людини треба мати уявлення про фізичні характеристики видимого світла. Залежно від поставлених завдань у фізиці наводяться три поняття про світлові явища.

У рамках геометричної оптики світло розглядають як пучки променів, що поширюються в напрямку перпендикулярному до хвильового фронту. Оптичні властивості людського ока як системи лінз найпростіше описуються поняттями геометричної оптики.

Світлові хвилі – це електромагнітні коливання, що поширюються у вигляді хвиль, характеризуються довжиною хвилі й амплітудою коливань, або інтенсивністю. Хвильова теорія корисна для ознайомлення з проблемами гостроти зору та кольорового зору.

Найглибшим і найбільш обґрунтованим підходом до вивчення природи кольору є підхід з погляду квантової механіки, в якій світло розглядається як сукупність певної кількості порції енергії (квантів), що називаються фотонами. Саме квантовий підхід дає змогу зрозуміти причини поглинання світла речовинами.

Світлом ми звичайно називаємо електромагнітні коливання, частоти яких відповідають довжинам хвиль від 320 до 760 нм. Кожному кольору відповідає довжина електромагнітної хвилі, яка і є причиною сприйняття цього кольору оком. Прийнято вважати монохроматичним (від грец. моно – один, хромос – колір) світло, що утворене випромінюванням з дуже вузької смуги довжин хвиль. Сукупність же променів усіх довжин хвиль (тобто монохроматичних) приблизно однакової інтенсивності людина сприймає як безбарвне світло, наприклад, сонячне.

Якщо таке світло потрапить на предмет, то виникає певне зорове відчуття, зумовлене вже не спектральним складом світла, а індивідуальними властивостями поверхні тіла. Під час потрапляння світла на поверхню будь-якого тіла можливі три різні процеси: світло може відбиватися, поглинатися або проходити крізь неї. Ми не знаємо абсолютно прозорих або непрозорих тіл. Разом з відбиванням може спостерігатися повне або часткове поглинання світла речовиною. Якщо поглинається однакова частка від усіх довжин білого світла, то речовина має відповідно чорний або сірий колір (що більше світла поглинається, то колір чорніший). Якщо світло відбивається повністю, то речовина здається чисто білою. Це трапляється не часто. Навколишні предмети значно частіше, порівняно із сірим, чорним або білим кольорами, радують око всіма барвами веселки.

Отже, для правильного оцінювання явища зору людини треба мати уявлення про фізичні характеристики видимого світла [14, с.30].

**5.2.** Як відомо, крім фізичних характеристик, що їх можна виміряти та виразити в об'єктивних, точних та однозначних фізичних одиницях, є людські (суб'єктивні) пояснення кольору. Ці пояснення ґрунтуються на взаємодії світлового потоку з оком людини і пов'язані з її відчуттями.

*Спробуйте відповісти на питання: «Як складається кольорове відчуття в людини» з позиції біології.*

**Відповідь.** Око людини здатне розрізняти близько 10 млн кольорів і є приймачем видимої людиною інформації.

Наближено можна розглядати око як оптичну систему, що фокусує зображення на сітківку, яка діє як перетворювач світла на нервові імпульси. Ці імпульси, в свою чергу, поділяються на групи і аналізуються як усередині сітківки, так і всередині мозку, щоб врешті-решт дати початок зоровому відчуттю. Відчуття кольору – це результат дуже складної послідовності фізіологічних і психологічних процесів, що відбуваються під час потрапляння світла на сітківку ока.

Розглянемо причину зорового відчуття. У наш час робочою гіпотезою наукових досліджень є триколірна теорія. Основні положення цієї теорії зводяться до можливого існування в сітківці ока трьох пігментів, що мають максимум поглинання в синій, зеленій та червоній ділянках спектра. А вся веселка барв, що її відчуває людина під час споглядання, є результатом «вираховування» часток трьох основних кольорів.

Ученим відомо лише два кольорові рецептори сітківки – колбочки та палички. Причому паличковий апарат є набагато чутливішим. Він продовжує працювати за слабого освітлення в сутінках, коли чутливість колбочок уже є недостатньою. За чорно-біле зорове відчуття відповідають палички, а кольорове зумовлене колбочками. Кількість колбочок значно менша від кількості паличок.

Клітинну структуру сітківки вивчено добре, але наші відомості про молекулярну структуру світлочутливої речовини клітин ока значно бідніші. Встановити молекулярну структуру біологічних систем взагалі дуже важко. А в цьому випадку воно ускладнене нестійкістю речовин. Саме тому вони й виконують свою функцію, що нестійкі і швидко змінюються, реагуючи на світло.

Із колбочок сітківки ока людини виділено два пігменти: родопсин (поглинає в синьо-зеленій ділянці спектра,  $\lambda = 500$  нм) і йодопсин (поглинає в зелено-жовтій ділянці спектра  $\lambda = 562$  нм). Складником цих пігментів є ретинен – нестійка до дії світла форма вітаміну А. Саме тому, якщо зір послаблюється, лікарі рекомендують їсти моркву, пити риб'ячий жир і вживати такі продукти, що містять багато вітаміну А.

Механізм виникнення нервового імпульсу під час потрапляння квантів світла на сітківку ока і роль похідних ретинену в цьому ще остаточно не з'ясований [14, с.31].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акимущин И.И. Мир животных. Рассказы о змеях, крокодилах, черепахах, лягушках, рыбах .Москва: Молодая гвардия, 1974. 320 с.
2. Альбертс Б., Брей Д., Льюис Дж., Рэфф М., Робертс К., Уотсон Дж. Молекулярная биология клетки: В 5 т. /Б. Альбертс, Д. Брей, Дж. Льюис, М. Рэфф, К. Робертс. Москва: Мир, 1986.
3. Артамонов В.И. Занимательная физиология растений /В.И. Артамонов. Москва: Агропромиздат, 1991. 336 с.
4. Барна І.В. Загальна біологія. Пробний підручник. 10 клас. Тернопіль: Підручники і посібники, 2008. 448 с.
5. Біологія. Підручник для 10 класу загальноосвітніх навчальних закладів /Данилова О.В., Шабанов Д.А., Брайон О.В., Данилов С.А. Харків: Торсінг, 2001. 256 с.
6. Биология: биографический справочник /Т.П. Бабий, Л.Л. Коханова и др. Київ: Наук. Думка, 1984. С.682-683.
7. Васильева Е.К., Скляренко В.М., Иовлева Т.В. и др. Величайшие люди планеты: Энциклопед. Справочник. Харьков: Фолио, 2008. 799 с.
8. Гин А.А., Андржеевская И.Ю. 150 творческих задач для сельской школы: учеб.-методич. Пособие. Москва: Народное образование, 2007. 234 с.
9. Кац Ц.Б. Биофизика на уроках физики /Ц.Б. Кац. Москва: Просвещение, 1988.
10. Корсун І. Електромагнітні хвилі: історія відкриття й дослідження властивостей. *Фізика та астрономія в рідній школі*. 2019. №3. С. 42-45.
11. Коршевнюк Т. Наскрізні змістові лінії в курсі біології основної школи. «Громадянська відповідальність». *Біологія і хімія в рідній школі*. 2018. №3. С.9-12
12. Маслова В.Р., Ткачова Л.І., Ткачова Л.В., Шайдурова С.О. Формування міжпредметних компетентностей у процесі вивчення шкільного курсу біології: Навчально-методичний посібник . Луганськ: СПД Резніков В.С., 2009. 208 с.
13. Неведомська Є., Бондаренко Ю. Дослідження впливу на організм мобільних телефонів. *Біологія і хімія в сучасній школі*. 2012. №1. С.20-21.
14. Перешивана Л. Барвники. Історична довідка. *Біологія і хімія в рідній школі*. 2019. №5. С.28-31.
15. Семячкина-Глушкова О.В. Загадки природы: живое электричество *Биология в школе*. 2013. №3. С.17-23.
16. Сергеев Б. Занимательная физиология. Москва: Молодая гвардия, 1977.

17. Тирінова А. Використання змінного електричного поля високої частоти в медицині. *Фізика та астрономія в рідній школі*. 2019. №3. С. 27-29.
18. Турпаев Т.М. Сравнительная физиология животных: В 3 т. /Т.М. Турпаев. Москва: Мир, 1977.
19. . WIKIPEDIA. URL:  
[https://ru.wikipedia.org/wiki/Ендрю\\_Філдінг\\_Гакслі](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ендрю_Філдінг_Гакслі).

Видання підготовлено до друку та віддруковано  
редакційно-видавничим відділом КНЗ «ЧОПОПП ЧОР»  
Зам. № 1576 Тираж 100 пр.  
18003, Черкаси, вул. Бидгощська, 38/1