

Лекція № 7

Тема: ПЕРЕДАЧА ІНФОРМАЦІЇ В СЕНСОРНИХ СИСТЕМАХ ОРГАНІЗМУ.

План:

1. Живі організми і передача інформації
2. Основні поняття теорії інформації. См. «Медичну інформатику».
3. Трансформація подразнень у рецепторах.
4. Терморецептори.
5. Фоторецептори.

Живі організми функціонують у зовнішньому середовищі, яке безперервно змінюється, і тому передумовою їхнього виживання є наявність у них здатності реагувати на ці зміни відповідною перебудовою своєї життєдіяльності, що дає можливість знаходити та захоплювати їстівні речовини, уникати пошкодження, відтворювати нащадків тощо. Початковою ланкою в усіх цих реакціях, які у багатоклітинних організмів завжди здійснюються за участю нервової системи, є перетворення впливу зовнішнього середовища (котрий звичайно позначають як *подразник* або *стимул*) у певний фізіологічний процес, що несе у собі *інформацію* про цей вплив.

Подразнення може полягати у дії на організм найрізноманітніших видів зовнішньої енергії (механічної, теплової, хімічної, гравітаційної, електромагнітної); в організмі ж відомості про неї передаються одним і тим самим механізмом — сигнальною діяльністю нервових клітин. Трансформація зовнішньої енергії у цю діяльність забезпечується особливими структурами, що позначаються як *рецептори* зовнішніх подразнень.

Рецептори мають властивість не тільки відмічати сам факт дії подразника, а й відображати певні його характеристики, виконуючи таким чином функцію перекодування цих характеристик у відповідні характеристики нервових сигналів. Такий процес створення і передачі інформації про зовнішні подразники позначається як *сенсорна* або *аферентна* діяльність організму, а структури, які її здійснюють, — як чутливі (сенсорні, аферентні) його системи. Цей процес є тим біофізичним механізмом, котрий повинен бути насамперед розглянутий при вивченні життєдіяльності організму як складної біофізичної системи.

Основні поняття теорії інформації

Згідно з К. Шенноном інформація — це міра тієї непевності, яка зникає після одержання відомостей про систему.

У теорії інформації вводиться важлива величина — *кількість інформації*. Розглянемо

простий приклад. Кожного разу, підкидаючи шестигранний кубик, ми одержуємо відомості про цифри на його гранях. Таким чином, зменшується непевність або наше незнання про систему. Для кубика число рівновірогідних подій $N=6$. Що більше число N , то вища непевність системи до одержання відомостей про неї. При одержанні таких відомостей кількість інформації підсумовується. Для забезпечення умов адитивності необхідно припустити, що кількість інформації / є логарифмічною функцією від кількості подій чи мікростанів N .

У разі визначення кількості інформації вибрано саме двійковий логарифм при основі 2; при цьому кількість інформації представляється у двійковому (бінарному) коді. Кількість інформації оцінюється в бітах. Для передачі одного двоїчного символу необхідна інформація в один біт.

Двійкова система широко використовується в ЕОМ для запису інформації у пам'ять машини. Мінімальною одиницею інформації, що адресується та обробляється в машині, є *байт* — вісім двійкових розрядів, порядкові номери яких розташовуються від нуля до семи (зліва направо).

Кожний з мікростанів системи ми можемо отримати в результаті одного з можливих повідомлень.

2. Трансформація подразнень у рецепторах

Первинною ланкою в діяльності кожної сенсорної системи є трансформація енергії зовнішнього подразника (стимулу) у біжучий сигнал - нервовий імпульс. Рецепторні структури, в яких відбувається така трансформація, пристосовані до реагування на подразники певної природи, що відповідно позначаються як *адекватні* до даного рецептора. Разом з тим така пристосованість не є абсолютною, і деякою мірою рецептори можуть активуватися також неадекватними подразниками. Спеціалізація рецепторів зумовлюється наявністю у них особливих механізмів, які дають їм змогу реагувати на дуже слабкі адекватні стимули; чутливість при цьому може досягати в деяких випадках практично межі можливості за відповідними фізичними законами.

Згідно з адекватною енергією всі рецептори можуть бути розподілені на механо-, термо-, хемо- та фоторецептори. У деяких водних тварин є також електрорецептори, для яких адекватним подразником є зміни електричного поля в електропровідному зовнішньому середовищі. В середині кожної з цих груп можна виділити низку підгруп, рецептори яких пристосовані для реагування на ті чи інші більш вузько обмежені характеристики відповідних подразників. Разом з тим, незважаючи на таку спеціалізацію, в усіх рецепторних структурах є загальний механізм, наявність якого визначається спільним для кожного рецептора кінцевим завданням: створювати біжучий нервовий імпульс. Як зазначалось у попередніх розділах, єдиним шляхом викликання такого імпульсу є деполяризація поверхневої мембрани закінчень (*терміналей*) чутливої (сенсорної) нервової клітини.

Рецепторний потенціал являє собою *аналогове* відображення подразнення, що відтворює амплітудні та часові характеристики останнього. Таке відтворення, котре часто позначається як *трансдукція* зовнішнього подразника, має деякі особливості. Амплітуда та тривалість подразнення перетворюються у відповідні характеристики зовсім іншого фізичного процесу — зміни мембранного потенціалу. Співвідношення цих характеристик є лінійними, але лише в певних межах; з часом вони поступово зменшуються (тобто чутливість процесу трансдукції знижується). Таке явище має

назву адаптації. Після припинення подразнення спостерігається коливання мембранного потенціалу в бік його підвищення (гіперполяризації) — так звана *післядія*.

Поява рецепторного потенціалу, в свою чергу, дає початок наступному процесу — ритмічному розряду потенціалів дії (нервових імпульсів), які поширюються по нервовому волокну (аксону) у відповідні нервові центри і у закодованій формі несуть інформацію про характеристики попередніх процесів. При цьому інтенсивність подразнення і, відповідно, амплітуда рецепторного потенціалу трансформуються у частоту цих імпульсів, а його тривалість — у тривалість розряду. Оскільки амплітуда рецепторного потенціалу внаслідок адаптації знижується, незважаючи на постійну силу подразнення, частота розряду також зменшується.

Таким чином, перетворення рецепторного потенціалу в розряд нервових імпульсів вносить обмеження в процес трансформації. Як уже зазначалося, виникнення потенціалу дії потребує певної порогової величини деполяризації мембрани; при допороговій величині генерації імпульсу не відбудеться. Співвідношення інтенсивності деполяризації та частоти розряду обмежене також зверху: у зв'язку з наявністю рефрактерності нервово волокно може передати лише певну обмежену частоту імпульсів. Завдяки дискретності сигналізації також виникають обмеження у передачі повідомлень про інтенсивність подразнення: при дуже коротких сигналах її взагалі не повинно було б бути, оскільки поодиноким імпульс, що виникає при цьому, підкоряється правилу «все або нічого»; у разі подовження сигналу можливий для передачі обсяг інформації збільшуватиметься.

Однозначної відповідності між структурою хімічної речовини та типом реагуючої на неї рецепторної клітини, як і у разі нюхової чутливості, не спостерігається. Так, «солодкими» є багато вуглеводів, а також і синтетичні сполуки, що не мають нічого спільного з ними (наприклад сахарин); «гіркими» є багато алкалоїдів рослинного походження, а також і хлорид калію.

У зв'язку з тим, що смакові рецепторні клітини є відносно великими за розміром, від них можна за допомогою мікроелектрода здійснити внутрішньоклітинне відведення потенціалів і зареєструвати рецепторні потенціали, що виникають під дією певних хімічних речовин. З'ясувалося, що такі клітини є не дуже специфічними і можуть відповідати на дію речовин, що належать до всіх чотирьох груп смакових подразників, але при цьому одні з них виявляють сильнішу подразнювальну дію, ніж інші. Відповідно при реєстрації імпульсної активності в аферентних волокнах смакового (язикоглоткового) нерва також не спостерігається повної специфічності. Разом з тим виділяються волокна, в яких речовини певної групи викликають інтенсивніший розряд імпульсів, ніж інші речовини. Тому остаточне визначення модальності подразника, як і в інших уже розглянутих сенсорних системах, повинно відбуватись у вищих ланках смакової системи на основі оцінки особливостей просторового розподілу імпульсації по різних аферентних волокнах.

Клітинні механізми трансдукції дії хімічних речовин у рецепторні потенціали смакових рецепторних клітин ще мало вивчені. Вони можуть дуже відрізнятися для різних смакових модальностей. Так, для кислого смаку, що викликається завжди кислотами, можлива пряма дія протонів на певні структури рецепторної мембрани, що призводить до збільшення її іонної проникності та виникнення відповідного трансмембранного струму. Для солоного смаку, який викликається в основному

хлоридом натрію, можливий вплив іонів Ma^+ на механізм активного перенесення іонів через рецепторну мембрану, що також може супроводжуватись електрогенним ефектом. Для гіркої та солодкої смаків без сумніву необхідна дія якихось внутрішньоклітинних посередників, синтез котрих ініціюється активацією відповідних мембранних рецепторів і які, в свою чергу, відкривають в мембрані необхідні іонні канали.

Терморецептори. Сприймання температури зовнішнього середовища та її змін є також дуже важливою властивістю організму, що визначає його поведінку (особливо у теплокровних організмів). Як показують психофізичні спостереження, при цьому йдеться про дві різні рецепторні системи — сприймання холоду та сприймання тепла. При локальному температурному подразненні невеликих ділянок шкірної поверхні можна легко показати різне їхнє просторове розташування у вигляді так званих *теплових і холодових* точок.

Біофізичні механізми трансформації температурного впливу у нервовий імпульс ще не з'ясовані; немає також переконливих даних про те, які саме рецепторні структури відповідають за терморецепцію. Можливо, що вони являють собою вільні нервові закінчення і є, таким чином, первинними рецепторами. Разом з тим особливості імпульсних розрядів у аферентних волокнах, що несуть інформацію про температурний подразник, вивчені досить детально. Вони характеризуються наявністю двох компонентів — статичного та динамічного. При постійній температурі шкіри у відповідних аферентних волокнах спостерігається імпульсна активність також постійної частоти. Для «холодових» волокон ця частота збільшується при охолодженні до певного максимуму, а далі починає зменшуватися. Для «теплових» волокон вона також збільшується, але при нагріванні теж до певного максимуму. У проміжній температурній зоні приблизно 31—36 °C) імпульсація спостерігається як у холодних, так і у теплових волокнах. Цей стан відповідає зоні комфорту, при якій суб'єктивно не відчувається ні холоду, ні тепла. При різкій зміні температури отримуємо динамічну відповідь — швидкий розряд імпульсів, частота яких залежить не лише від величини температурного зсуву, а й від його швидкості. Така відповідь виникає при підвищенні температури у теплових волокнах, а при зниженні — у холодних.

Фоторецептори. Фоторецепторна система — найскладніша за своєю організацією серед інших рецепторних систем. Ця складність зумовлюється особливостями її онтогенетичного розвитку у хребетних тварин, в ході якого вона закладається як частина центральної нервової системи, що потім висувається на периферію, де диференціюється у світлосприймальну структуру ока — *сітківку (ретину)*.

Власне фоторецепторні клітини — *палички та колбочки* — знаходяться і самому глибокому за напрямом ходу світла шарі сітківки, що межує з Пігментним епітелієм. Тому світло до попадання на них повинне пройти через кілька шарів нервових елементів. Така *інвертована* будова жа характерна для всіх хребетних тварин. Колбочки є рецепторними елементами центральної частини сітківки, на яку проєкується оптична вісь з'єднуючих оптичних елементів очного яблука, а палички — рецепторними елементами периферичних її частин. Палички і колбочки поділяються на два сегменти, що з'єднані між собою тонкою ніжкою (цилією). Зовнішній сегмент (спрямований до пігментного епітелію) містить у собі світлосприймальний механізм, а внутрішній — ядро та інші внутрішньо-літальні структури.

В основі трансформації енергії світла, як у колбочках, так і у паличках лежить

фотохімічна реакція, що виникає в особливих макромолекулярних полугах — зорових пігментах. Ця трансформація досліджена найбільш ґрунтовно в паличках, в яких зоровим пігментом є *зоровий пурпур або родопсин*. Родопсин розміщений в особливих внутрішньоклітинних мембранних структурах зовнішнього сегмента — так званих *мембранних дисках*, де він монтований у ліпідний бішар. Родопсин інтенсивно поглинає світло, маючи при цьому два максимуми поглинання: у видимій ділянці спектра (500 нм) та в ультрафіолетовій (350 нм). Аналогічно розміщено зоровий пігмент колбочок, але не в ізольованих внутрішньоклітинних дисках, а в глибоких прогинаннях плазматичної мембрани.

При поглинанні світла виникає хімічне перетворення родопсину, основним моментом якого є фотоізомеризація групи, що має назву *хромофора або ретиналю*, а саме перехід її із *цис-* у *транс-форму* і кінцеве перетворення у так званий метародопсин. Цей перехід супроводжується деякими іншими перетвореннями і закінчується відщепленням метародопсину від білка-носія (опсину). Відновлення вихідної конформації родопсину можливе лише в темряві за участю ферментів пігментного епітелію. Саме тому необхідна орієнтація світлочутливих клітин у глибину сітківки. При різних рівнях освітлення відбувається зсув рівноваги цих реакцій у той чи інший бік. Відповідно змінюється концентрація світлочутливого пігменту і чутливість рецепторів до світла (адаптація).

Хімічна структура зорових пігментів колбочок вивчена менш детально. Але за допомогою мікрофотометричних вимірів спектрів поглинання окремих клітин встановлено важливий факт: вони, залежно від максимуму поглинання світлової хвилі, розподіляються на три типи, що відповідають суб'єктивно червоній, зеленій та синій частинам спектра. Отже, окремі колбочки містять якийсь один із трьох типів світлових пігментів. Ця особливість лежить в основі здатності зорового апарату розрізняти довжину світлової хвилі (її колір). Палички, які містять родопсин, однакові за своїми спектрами поглинання, тому вони не можуть бути детекторами довжини світлової хвилі і є детекторами лише її інтенсивності. Внаслідок високої чутливості вони здатні реагувати на дуже слабкі подразнення і тому є апаратом *присмеркового зору*. Пігменти колбочок характеризуються значно меншою чутливістю і тому використовуються організмом для денного зору.

Конформаційні зміни молекул зорових пігментів за допомогою складних внутрішньоклітинних процесів призводять врешті до змін мембранного потенціалу тієї частини палички чи колбочки, яка контактує з наступними нервовими елементами сітківки, тобто до виникнення рецепторного потенціалу, амплітуда та тривалість якого відображають відповідні характеристики світлового подразнення. На відміну від усіх інших рецепторів, цей рецепторний потенціал має не деполяризаційну, а гіперполяризаційну природу. Прямі мікроелектродні реєстрації показують, що мембранний потенціал фоторецепторної клітини може збільшуватися під впливом світла від -25 до —40 мВ.

Література:

П.Г.Костюк, В.Л.Зима, І.С.Магура, М.С.Мірошніченко, М.Ф.Шуба. Біофізика.
Частина IV. Розділ 13.