**Моделювання біофізичних процесів зорової системи**

моделювання зоровий аналізатор

**Поняття моделювання біофізичних процесів**

Живий організм являє собою занадто складну систему, щоб його можна було розглядати відразу у всіх подробицях, тому дослідник завжди вибирає спрощену точку зору, що підходить для рішення конкретно поставленої задачі. Це свідоме спрощення реальних біосистем і лежить в основі методу моделювання.

Модель – це умовний образ реального об'єкта, сконструйованого дослідником так, щоб відобразити характеристики об'єкта (властивості, взаємозв'язку, структурні і функціональні параметри і т.д.), істотні для цілей дослідження. Під моделюванням у даний час розуміють не тільки предметне, що копіює моделювання, але і науковий метод дослідження і пізнання глибокої сутності явища й об'єктів. Основою моделювання є єдність матеріального світу й атрибутів матерії – простору і часу, а також принципів руху матерії.

Моделі, використовувані в медицині і біології, звичайно поділяють на три категорії:

1. Біологічні предметні моделі, на яких вивчаються загальні біологічні закономірності, патологічні процеси, дія різних препаратів, методи лікування і т.д. До цього класу моделей можуть бути віднесені лабораторні тварини, ізольовані органи, культури кліток, суспензії органел, фосфоліпідні мембрани і т.д.
2. Фізичні (аналогові) моделі, тобто фізичні системи, що володіють аналогічним з моделюємим об'єктом поводженням. Наприклад, деформації, що виникають у кісті при різних навантаженнях, можуть бути вивчені на спеціально виготовленому макеті кісти. Рух крові по великих судинах моделюється ланцюжком опорів, ємностей і індуктивностей. До фізичних моделей можна також віднести технічні пристрої, чи тимчасово постійно заміняють органи і системи живого організму: апарати штучного дихання (модель легень), штучного кровообігу (модель серця), кардіостимулятори і т.д.

3. Математичні моделі являють собою системи математичних виражень – формул, функцій, рівнянь і т.д., що описують ті чи інші властивості досліджуваного об'єкта, явища, процесу. При створенні математичної моделі використовують фізичні закономірності, виявлені при експериментальному вивченні об'єкта моделювання. Так, математичні моделі електричних явищ в органах, наприклад, опис форми електрограм, засновані на законах електродинаміки, а моделі кровообігу – на законах гідродинаміки. Останнім часом завдяки використанню ЕОМ різко розширилися можливості одержання кількісних відповідей методом математичного моделювання, і стало можливим вивчати цим методом набагато більш складні системи. Це привело до значного підвищення наукового і практичного значення математичного моделювання.

Математичне моделювання як метод дослідження володіє рядом безсумнівних достоїнств:

По-перше, сам метод викладу кількісних закономірностей математичною мовою, тобто мовою графіків і формул, точний і ощадливий.

По-друге, перевірка гіпотез, сформульованих на основі досвідчених даних, може бути здійснена шляхом іспиту математичної моделі, створеної на основі цієї гіпотези. Результати такого дослідження або дають додаткові підтвердження гіпотез, або приводять до необхідності їхнього уточнення чи навіть перегляду.

По-третє, математична модель дозволяє судити про поводження таких систем і в таких умовах, що важко створити в експерименті в чи клініці, вивчати роботу досліджуваної системи цілком чи роботу будь-якої її окремої частини.

Практична цінність методу математичного моделювання полягає в наступному:

1. правильно складена і усебічно використана математична модель дозволяє зменшити час дослідження біосистем, скоротити кількість тварин, необхідних для такого дослідження, і число досвідів;
2. математична модель полегшує рішення задач прогнозування ходу і результатів експериментів, плину хвороб, ефектів лікувальних впливів. Таке прогнозування дозволяє підібрати оптимальні варіанти, лікування, зокрема застосування лікарських препаратів.

Сучасна біофізика включає математичне моделювання як необхідний етап наукового дослідження. Типова робота в області біофізики починається з експерименту, і одержувані експериментальні дані піддаються математичній обробці (побудова таблиць, графіків, гістограм, підбор емпіричних формул для опису експериментальних залежностей). Цей матеріал є основою для створення робочої гіпотези.

Математична модель, створена на основі цієї гіпотези, може правильно описувати поводження системи, хоча фізичні основи спостерігаються в експерименті й описуваних моделлю процесів можуть бути не розкриті. Поглиблення досліджень на другому етапі, так чи інакше, зв'язано з вивченням молекулярної і клітинної будівлі досліджуваних біологічних систем. У кінцевому рахунку, це дозволяє сформулювати більш змістовну структурно-функціональну модель роботи даної клітки, чи тканини органа. Кінцевою метою такого дослідження є створення біофізичної теорії, що дозволяє пояснити властивості і поводження складної біологічної системи на основі знання фізичних принципів, що лежать в основі функціонування складових її елементів.

Моделі бувають геометричні, біологічні, фізичні (фізико-хімічні) і математичні.

Геометричні моделі – найбільш простий їхній різновид. Це зовнішнє копіювання оригіналу. Муляжі, використовувані у викладанні анатомії, біології і фізіології, є геометричними моделями. У побуті геометричні моделі часто використовуються з пізнавальної чи декоративно – розважальною метою (моделі автомашин, залізниці, будинків, ляльки і т. п.).

Створення біологічних (фізіологічних) моделей засновано на відтворенні в лабораторних умовах визначених станів, наприклад захворювання в піддослідних тварин. В експерименті вивчаються механізми виникнення стану, його плин, способи впливу на організм для його зміни. До таких моделей відносять штучно викликані інфекційні процеси, гипертрофировання органів, генетичні порушення, злоякісні новотвори, штучно створені неврози і різні емоційні стани.

Для створення цих моделей на піддослідний організм виробляються усілякі впливи: зараження мікробами, уведення гормонів, зміна складу їжі, вплив на периферичну нервову систему, зміна умов і середовища життя і ін. Біологічні моделі важливі для біології, фізіології, фармакології і генетики.

Створення фізичних і фізико-хімічних моделей засновано на відтворенні фізичними і хімічними способами біологічних структур, чи функцій процесів. Фізико-хімічні моделі більш, ідеалізовані, чим біологічні, і являють собою далеку подобу моделюємого біологічного об'єкта.

Як приклад однієї з перших фізико-хімічних моделей можна привести модель росту живої клітки (1867), у якій ріст імітувався вирощуванням кристалів CuSO4 у водяному розчині Си [Fe(CN)6]. Ця проста модель заснована лише на зовнішньому, головним чином якісному, подобі моделі натурі.

Моделі, засновані на кількісній подобі, більш складні  
 і будуються, у багатьох випадках, на принципах електротехніки й електроніки з використанням експериментального матеріалу по електрофізіології.

Розроблені моделі використовуються при побудові механічних машин з електронним керуванням, що імітує деякі акти поводжень тварин (утворення умовного рефлексу, пам'яті, гальмування і т. п.). Для ефекту наочності цим машинам часто додають зовнішній вигляд тварин: миші; черепахи, білки. Важливим у практичному відношенні є моделювання фізико-хімічних умов життя окремих кліток, всього організму в цілому. Створені штучно розчини імітують середовище, що підтримує існування поза організмом окремих органів і кліток.

Штучні біологічні мембрани дозволяють вивчати фізико-хімічну природу їхньої проникності для іонів і вплив на неї різних зовнішніх факторів.

Математичне моделювання біологічних об'єктів являє собою аналітичний опис ідеалізованих процесів і систем, адекватних реальним.

Ідеальних систем і процесів у природі не існує, однак отримані результати у відомих межах можна застосовувати до реальних процесів і систем, тому що вони мають загальні властивості з ідеальними. Подібний метод абстракцій використовується й у фізиці.

Математичні моделі будуються або на основі експериментальних  
 даних (матеріальне, чи предметне, моделювання), використовуючи гіпотезу чи відому закономірність якого-небудь явища. При цьому, друге теоретичне, моделювання вимагає наступної досвідченої перевірки.

Особливо корисно теоретичне моделювання там, де провести експеримент неможливо чи складно. «Програвання» на ЕОМ математичної моделі біологічного процесу, важко відтвореного в експерименті, дозволяє передбачати зміна процесу в залежності від умов, пророчити деякі нові явища. Так, дослідження моделі серцевої діяльності, заснованої на теорії релаксаційних коливань, дозволило пророчити особливе порушення серцевого ритму, згодом виявленого в людини.

У ряді випадків для фізично різних моделей одержують однакові диференціальні рівняння. Так, наприклад, однакові рівняння описують загасаючі механічні й електричні коливання чи аперіодичний розряд конденсатора, поглинання світла речовиною і закон радіоактивного розпаду. У цієї аналогічності диференціальних рівнянь, що відносяться до різних явищ, можна доглянути єдність природи. Така особливість дозволяє використовувати аналогії при математичному моделюванні, а відповідні моделі називають предметно-математичними моделями прямої аналогії.

Вивчення явищ за допомогою математичних моделей підрозділяється на чотири етапи.

Перший етап складається у виділенні об'єктів моделювання і формулюванні законів, їх єднальних. Він завершується записом у математичних термінах представлень про зв'язки між об'єктами.

На другому етапі відбувається дослідження математичних задач, що випливають з математичної моделі. Метою цього етапу є рішення прямої задачі, тобто одержання даних, які можна порівняти з результатами досвіду чи спостережень, Для рішення поставлених задач використовуються математичний апарат і обчислювальна техніка, що дозволяє одержати кількісну інформацію.

Третій етап дозволяє з'ясувати, наскільки висунута гіпотетична модель задовольняє критерію практики. Рішення цього питання зв'язано з відповідністю теоретичних наслідків експериментальним результатам. У рамках цього етапу часто зважується зворотна задача, у якій визначаються не відомі раніше деякі характеристики моделі за результатами зіставлення вихідної інформації з результатами спостережень.

Запропонована модель непридатна, якщо ні при яких значеннях її характеристик не можна погодити вихідну інформацію з експериментом.

У четвертий етап входить аналіз моделі в результаті нагромадження даних про неї і її модернізація.

У залежності від характеру моделей їх умовно поділяють на феноменологічні і структурні.

Феноменологічні (функціональні) моделі відбивають тимчасові і причинно-наслідкові відносини між параметрами, що характеризують функції біологічного об'єкта без обліку його структури.

Об'єкт розглядається як «чорна шухляда» – система, у якій зовнішньому спостерігачу доступні лише вхідні і вихідні величини, а внутрішня структура невідома. Метод «чорної шухляди» широко застосовують для рішення задач моделювання складних кібернетичних систем у тих випадках, коли інтерес представляє поводження системи. Так, наприклад, з огляду на складну «конструкцію» мозку людини і ризик прямого приладового впровадження в його структури, резонно досліджувати мозок як «чорна шухляда». Це можна робити, досліджуючи розумові здібності людини, його реакцію на звук, світло і т.д.

Структурні моделі будуються з урахуванням структури об'єкта, що відбиває його ієрархічні рівні.

При цьому до структури відносять приватні функції окремих підсистем. Такі моделі краще виражають сутність біологічних систем, але складні для обчислень.

Складання моделей виробляється за визначеною схемою. Спочатку формулюється мета моделювання, потім висловлюється гіпотеза, що представляє якісний опис системи, вибираються тип моделі і математичні методи її опису в залежності від мети і роду інформації. Заключний етап складається в створенні моделі і порівнянні її із системою-об'єктом з метою ідентифікації.

**Структурне моделювання зорової системи**

Зоровий аналізатор являє собою складну функціональну систему, що містить багато рівнів для переробки зорової інформації, якість роботи якої багато в чому визначається особливостями її будівлі і характером розв'язуваних задач.

Функціональна система по П.К. Анохіну – це центрально-периферичне замкнуте утворення з безупинним зворотним зв'язком (зворотної аферентації), що працює за принципом саморегуляції. У неї можуть входити як близько, так і далеко розташовані друг від друга анатомо-фізіологічні компоненти, зв'язані з виконанням якоїсь визначеної функції і досягненням пристосувального ефекту за рахунок залучення в реакцію різних структур.

Зоровий акт сприйняття носить системний характер, включає ряд операцій, що забезпечуються різними механізмами, локалізованими як у специфічній сенсорній системі, так і за її межами. У процесі сприйняття здійснюється прийом і виділення окремих ознак сигналу, порівняння їх між собою і з наявними внутрішніми еталонами, створення адекватних гіпотез про характер стимулу і віднесення його до окремої категорії (упізнання).

Сприйняття об'єктів зоровою системою в нормі здійснюється за допомогою двох очей, на сітківці кожного з якого формується зображення. Якщо система «справна» і функціонує нормально, то ці зображення при подальшій їхній обробці накладаються один на одного і зливаються в єдиний зоровий образ, що локалізується у визначеній крапці простору.

Технічно зоровий аналізатор може бути реалізований як пристрій з автоматичною системою спостереження, що самофокусується й автоматично підбудовується до різної інтенсивності світла, що має самоочисні лінзи і приєднане до комп'ютеру з настільки розвитими можливостями рівнобіжної обробки інформації, що аналогів у реально існуючій апаратурі не має. Ця система вирішує задачу не тільки одержання чітких зображень реального світу, але і перетворить і осмислює зорову сцену, витягаючи всю корисну інформацію і відкидаючи зайву.

Ніякий людський винахід, включаючи керовані комп'ютером камери, не може суперничати з людськими очима.

Зоровий аналізатор може бути представлений у виді спрощеної структурної блок-схеми. У ньому можна виділити два відділи – периферичний і центральний. До периферичного відділу відносяться блок наведення і фокусування, блок прийому і первинного аналізу і частково передавальні шляхи. До центрального відділу також частково відносяться передавальні шляхи і блок керування й аналізу. Такий поділ системи на два відділи обумовлено особливостями її функціонування.

Периферичний відділ забезпечує прийом, первинну переробку і передачу зорової інформації в центральний відділ. У центральному відділі відбувається остаточна переробка й усвідомлення інформації, формуються керуючі сигнали в різні блоки периферичного відділу з метою поліпшення його функціонування за рахунок «підстроювання» активних елементів. Передавальні шляхи ми віднесли до обох відділів, що обумовлено їхньою структурною організацією. Вони починаються на сітківці і закінчуються в корі потиличної частки мозку, тобто пронизують обидва відділи зорової системи.

На схемі (рис. 1) представлений зоровий шлях, що починається на сітківці і закінчується в корі головного мозку, тобто об'єднуючий між собою три блоки (блок прийому і первинного аналізу, що передають шляхи і блок керування й аналізу). Кожний із блоків зорової системи має свою структурну організацію і системну функцію. Розглянемо кожний із блоків зорової системи.

I. Блок наведення і фокусування. Цей блок забезпечує одержання зорової інформації на сітківці. Він включає окорушивні м'яза, що забезпечують необхідні для одержання зорової інформації повороти ока; акомодаційний апарат, що фокусує зображення об'єкта на сітківці; зіниця, що є діафрагмою, що регулює кількість світлової енергії, що надходить на сітківку; оптичні середовища ока (роговиця, камерна волога, склоподібне тіло), що забезпечують фокусування зображення і безперешкодне проходження світла.

II. Блок прийому і первинного аналізу. Цей блок забезпечує прийом світлового сигналу, його первинну обробку за рахунок виділення контуру зображення і перетворення світлової енергії в електричний сигнал. Структурно II блок реалізований у виді сітківки.

III. Передавальні шляхи. Цей блок забезпечує передачу зорової інформації від первинного аналізатора в блок керування. Структурно III блок реалізований у виді периферичного і центрального нейронів.

IV. Блок керування й аналізу. Здійснює переробку й аналіз зорової інформації, що надходить, формує керуючі сигнали зворотного зв'язку, що регулюють функції елементів зорової системи (наприклад, кривизну хрусталика, напругу окорушивних м'язів, діаметр зіниці). Структурно IV блок зорової системи реалізований у виді підкіркових і коркових зорових центрів.

Основна відповідальність за одержання якісної зорової інформації лежить на першому блоці зорової системи, що складається як з активних (окорушивних м'язів, циліарного м'яза і м'язи сфінктера зіниці), так і аапасивних елементів (роговиця, камерна волога, склоподібне тіло). Пасивна частина оптичних середовищ ока в процесі виконання зорової роботи практично не змінюється і не може корегуватися блоком керування.

Роговиця і хрусталик разом утворять еквівалент лінзи фотоапарата. Приблизно дві третини загального переломлення світла, необхідного для фокусування, відбувається на границі повітря – роговиця, де світло входить в око. Третину, що залишилася, фокусуючої здатності реалізує хрусталик, але його головна задача – забезпечити необхідне регулювання для фокусування системи на об'єктах, розташованих на різних відстанях від ока. В оці, на відміну від фотоапарата, відбувається зміна не відстані від лінзи до фотосприймаючої поверхні, а форми самої лінзи – хрусталика, за рахунок чого змінюються його оптична сила і фокусна відстань. Для розглядання близьких об'єктів хрусталик, за допомогою прикріплених до нього сухожиль, робиться більш опуклим, а для вилучених – більш плоским. Ці зміни форми здійснює сукупність радіальних м'язів, називаних циліарними. Таким чином, хрусталик, будучи активним елементом оптичної системи ока, регулюється блоком керування. Змінюючи свою кривизну, він забезпечує одержання чіткого зображення на первинному аналізаторі (сітківці). Рефлекс, що приводить до скорочення циліарних м'язів і що робить хрусталик більш опуклим, визначається блоком керування і тісно зв'язаний з рефлексом, що контролює відповідні повороти очей.

Дві сукупності м'язових волокон (радіальні і кільцеві) змінюють діаметр зіниці й у такий спосіб регулюють кількість світла, що надходить в око. Цей процес також контролюється блоком керування і зв'язаний функціональним зв'язком із процесами акомодації і конвергенції.

Кожне око встановлюється в очниці у визначене положення шістьма екстраокулярними м'язами, що розбиваються на три пари, причому м'яза кожної пари працюють у противофазі, забезпечуючи рух очей у трьох ортогональних площинах. Для обох очей задача спостереження за об'єктом повинна виконуватися з точністю до декількох кутових хвилин, інакше видиме зображення буде двоїтися. Настільки точні рухи вимагають для своєї реалізації набір тонко набудованих рефлексів, включаючи ті, котрі контролюють положення голови.

Зі складного сполучення дії окремих м'язів обох очей складаються їх спільні координовані рухи (вольові і рефлекторні), що керуються і контролюються блоком керування.

Для забезпечення найкращих умов для одержання інформації зоровою системою окорушівні м'язи повинні певним чином повертати, а, найчастіше, довгостроково утримувати очні яблука в строго визначеному положенні. Так що зрозуміло їхню істотну роль у процесі зорового сприйняття.

Уся сукупність несітчастих частин очей, описана вище, призначена для забезпечення одержання на двох сітчатках сфальцьованого чіткого зображення зовнішнього світу, що, перш ніж буде усвідомлене і проаналізовано, повинне перетерпіти безліч перетворень, здійснюваних, наступними за першим, блоками зорової системи.

Другим блоком зорової системи є приймач і первинний аналізатор – сітківка. Вона перетворить світло в нервові сигнали, дозволяє сприймати інформацію при різній освітленості, розрізняє довжини хвиль (сприйняття кольору), забезпечує високу здатність ока, що дозволяє.

Сітківка – частина мозку, що відокремилася від нього на ранніх стадіях розвитку і зв'язана з ним за допомогою зорового нерва. Товщина сітківки не перевищує чверті міліметра. Вона містить три шари тіл нервових кліток, розділених двома шарами синапсів, утворених аксонами і дендритами цих кліток. Шар на задній поверхні сітківки містить світлочутливі рецептори – палички і колбочки. Палички відповідальні за сутінковий зір, колбочки за тонкі деталі і колірний зір.

У центральній зоні сітківки (центральній ямці), розміром у півміліметра, маються тільки колбочки, ця зона найбільш точного зору. У цій зоні всі шари сітківки зміщаються до периферії, утворюють кільце й оголяють центральні колбочки, тобто колбочки розташовуються в самій поверхні, тоді як у всій іншій сітківці світло повинне пройти через два передніх шари і стимулювати їх. Ці шари перед рецепторами досить прозорі і, імовірно, не сильно шкодять чіткості зображення.

Наявність на сітківці ділянки з найбільш високим зором, дуже маленького по площі, показує ту істотну роль першого блоку зорової системи в точності настроювання і фокусування. Ця точність необхідна відразу двом очам, у противному випадку можливі всякі розлади сприйняття, що приводять не тільки до функціонального, але і до структурної перебудови зорової системи в цілому і її роботі зі скороченій програми.

Око містить 125–130 мільйонів паличок і колбочок, що зв'язані з 1 мільйоном гангліозних кліток, причому зв'язку центральних колбочок з гангліознимі клітками інші, чим зв'язки інших паличок і колбочок. Різні по характері зв'язку дозволяють одержати різний по гостроті зір. Об'єкти зовнішнього світу зображуються оптичною системою ока на сітківці у виді світлового потоку різної щільності. Розподіл порушень світлочутливих елементів сітківки відповідає розподілу на ній освітленості. Вже в самій сітківці відбувається складна обробка сигналів, що надходять від фоторецепторів. Це підтверджується тим, що на 130 мільйонів рецепторів приходиться всього 1 мільйон волокон зорового нерва, причому частина з них відцентрові. Тобто вже на рівні сітківки відбувається квантування первісне безупинного зображення. Дискретність, внесена зоровою системою, обмежує кількість інформації про об'єкти, що надходить у вищі відділи. Обмежено число помітних градацій яскравості, зображення складається з кінцевого набору дискретних елементів, усередині яких зміни яскравості не можуть бути розрізнені. Зорове сприйняття дискретне і в часі, око не розрізняє змін, що відбуваються за занадто малий час. Пропускна здатність сітківки складає десятки мільйонів двоічних одиниць у секунду, а для всього зорового аналізатора пропускна здатність не перевершує декількох десятків двоічних одиниць у секунду. Изольованно розглянута сітківка може пропустити великий потік інформації, однак одержувач повідомлень – вищі відділи зорового аналізатора – робить строгий вибір інформації з потоку повідомлень, оскільки він характеризується великою статистичною надмірністю, а в міру проведення кодування інформації для передачі у вищі відділи, повідомлення представляються в усі більш ощадливій формі.

Число нейронних каналів, що беруть участь у передачі зорової інформації, з кожним кроком зменшується, причому інформація стає на один крок ближче до тієї форми, у якій вона використовується і зберігається в пам'яті.

Таким чином, пропускна здатність зорового аналізатора – це гранична кількість інформації, що може бути сприйнято зоровою системою в цілому.

На рівні первинного аналізатора – сітківки статистична надмірність зображень не усунута і природне необхідна висока пропускна здатність передавальних шляхів. У вищих відділах зорового аналізатора, завдяки статистичному кодуванню, надмірність зменшується настільки, що тут потрібно набагато менша пропускна здатність. Це обумовлено тим, що у вищих відділах зорового аналізатора виробляється кодування великих сукупностей зв'язаних елементів у формі зорових образів.

Зоровий аналізатор є системою зв'язку, що служить для передачі зведень про стан зовнішнього світу у вищі відділи ЦНС. У будь-якій подібній системі для передачі повідомлень повинний існувати ряд операцій (квантування, нагромадження, виділення сигналу із шуму, декореляції й ін.), що у зоровій системі виконуються рецептивними полями сітківки – універсальними поліфункціональними утвореннями.