

Ukr Neurosurg J. 2022;28(3):17-24  
doi: 10.25305/unj.246926

## Біофізичні аспекти електромагнітної теорії сприйняття зором людини світлової інформації видимого діапазону

Поліщук О.В.<sup>1</sup>, Тиханова О.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Відділ інформаційного забезпечення, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Науково-організаційний відділ, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 11.12.2021  
Прийнята до публікації 19.07.2022

### Адреса для листування:

Поліщук Олександр  
Володимирович, відділ інформаційного забезпечення, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, 04050, Україна, e-mail: polishuk.neuro@gmail.com

**Мета:** створити електромагнітну модель розпізнання людиною світлової інформації, яку вона отримує у видимому діапазоні світла, що дає змогу строго та на підставі розрахунків довести її спроможність, а також моделі електронних схем, які ілюструють, як простими з'єднаннями палички та колбочки можуть забезпечити її реалізацію, і на їхній основі запропонувати гіпотезу про передачу перетвореної інформації в режимі реального часу в центральну нервову систему (ЦНС), а також гіпотезу об'ємного сприйняття зоровим аналізатором та ЦНС зовнішньої інформації.

**Матеріали і методи.** Проведено математичне моделювання апроксимації даних у біології та медицині числових значень параметрів за експериментальними даними, сукупності формул і рівнянь, що описують властивості досліджуваного об'єкта і дають змогу встановити кількісні співвідношення між ними.

**Результати.** Розроблена авторами модель електромагнітного сприйняття зором людини електромагнітних хвиль видимого діапазону спектра на підставі їх резонансного розділення та підсилення дає змогу запропонувати вирішення проблеми теорії кольорового зору. Розрахунки швидкості на підставі сальтаторного проведення інформації по нервовому волокну пояснюють суб'єктивне відчуття людиною світла практично миттєво. Запропонована авторами гіпотеза об'ємного відчуття людиною зовнішнього світу потребує математичного обґрунтування. Можна вважати, що це ще один крок до розв'язання проблеми сприйняття людиною світлової інформації.

**Висновки.** Запропонована електромагнітна теорія кольоросприйняття зоровим аналізатором людини світлової інформації. На підставі розрахунків електрофізіологічних параметрів молекул родопсину, що входять до складу паличок, розроблено модель резонансного сприйняття зором людини електромагнітних коливань видимого діапазону світла. Розрахунки за допомогою розробленої моделі перетворення інформації видимого світлового діапазону електромагнітного спектру дали змогу точніше визначити кількість відтінків кольорів, які розрізняє людське око. Запропоновано математичну модель, яка описує передачу в ЦНС інформації про спектр та інтенсивність електромагнітного сигналу видимого діапазону спектру, перетвореного очима. Розраховано швидкість передачі інформації в зоровому нерві. Запропоновано гіпотезу об'ємного сприйняття зоровим аналізатором та ЦНС зовнішньої інформації. Практичним застосуванням розробленої моделі можуть бути створені на її основі прилади, які дадуть змогу відновити зір, а також прилади для корекції функції зору.

**Ключові слова:** родопсин; ЦНС; фотоефект; фемтосекунда; 11-цис-ретиналь; індуктивність; ємність; опір; резонанс; мембрана.

### Вступ

Перше строге математичне доведення теорії світла та кольору наведено І. Ньютоном у 1672 р. у праці «Нова теорія світла та кольору», в якій він довів, що світло не монохромне [1].

М. Ломоносов, К. Мюллер, Т. Юнг, Г. Гельмгольц та інші дослідники у XVIII–XIX ст. провели передові для свого часу дослідження, але не змогли створити основу теорії кольорового зору [2].

У 1960-х роках Дж. Уолд і співавт. (Гарвардський університет, США), лауреати Нобелівської премії

з фізіології та медицини (1967), а також Ю.А. Овчинников (Інститут біохімічної фізики імені М.М. Емануеля РАН) та М.І. Островський і співавт. (Інститут біохімічної фізики імені М.М. Емануеля РАН) розробили молекулярну фізіологію зорового пігменту [3].

Обговорюючи внутрішньомолекулярні механізми спектрального налаштування зорових пігментів, слід згадати серію недавніх робіт японських авторів [4], у яких були використані комбіновані методи квантовомеханічних розрахунків і моделювання методом молекулярної механіки (QM/MM). Хромофорна



група молекули розглядалась у цих роботах у межах квантовомеханічного підходу, а білкові оточення — у межах методів молекулярної механіки. Результати цих розрахункових робіт засвідчують, що спектральне налаштування, на думку авторів, визначається взаємодією ретинального хромофору з комплексом протиіону та білковим оточенням. Вплив змін структури самого хромофору (наявність залишку 11-цис-ретиналю) або 11-цис-3,4-дегідроретиналю) незначний [5].

Розглянуто три чинники, від яких залежить положення максимуму поглинання зорового пігменту:

1. природа хромофору та його конфігурація;
2. взаємодія хромофору з комплексом протидії;
3. взаємодія хромофору з найближчим білковим оточенням.

Спектральне налаштування пігменту визначають два останні чинники. Природа хромофору та його ізомірна конфігурація для всіх пігментів одні й ті самі – залишок ретиналя з 11-цис-конфігурацією. Отже, однією з найважливіших фізіологічних функцій ретинального хромофору у хромофорному центрі є «налаштування» спектральної чутливості зорового пігменту. Таке внутрішньомолекулярне налаштування, на думку авторів, забезпечує адаптацію фоторецепторних клітин органів зору безхребетних і хребетних тварин до світлового середовища проживання та формування механізму колірної сприйнятності [6].

Незважаючи на велику кількість робіт із трикомпонентної теорії кольорового зору, не вдалося виявити жодних відмінностей між колбочковими рецепторами сітківки очей, не кажучи вже про наявність трьох різних видів колбочок.

Крім того, доведено існування всього двох світлочутливих пігментів — хлоролабу і еритролабу. Не доведена їхня одночасна наявність у всіх колбочках сітківки. Водночас спектри чутливих пігментів мають широкосмуговий спектр, тобто по всій області видимого спектра.

Недостатньо вивчене нібито просте запитання: чому в людини колбочок, за різними даними, від 5 до 6 млн, а паличок – у 10 разів більше (80–90 млн), а також, які еволюційні процеси розвитку зору в людини зумовили, що за сприйняття світла має відповідати в 10 разів менше рецепторів, ніж за чутливість до яскравості світла, в який спосіб відбувається розділення кольорів на рівні сітківки ока.

Жодна із запропонованих гіпотез не може підтвердити чи спростувати три основні теорії:

- трикомпонентну теорію кольорового зору;
- опонентну теорію кольорового зору;
- нелінійну теорію зору.

Загальноприйнято, що теорія може вважатися прийнятною у разі відповідності таким вимогам:

- ґрунтуватися лише на об'єктивних, перевірених експериментальних даних;
- бути об'єктивною та описуватися математичними залежностями в реальному тривимірному просторі;
- ґрунтуватися на фізичних законах без будь-яких наближень чи винятків [7].

Ця робота присвячена розробці теорії сприйняття зором людини електромагнітного випромінювання видимого діапазону на підставі науково доведених фізичних властивостей електромагнітної природи світла, а також анатомічних характеристик ока,

експериментальних випробувань у галузі фотохімії родопсину. Проведено теоретичні дослідження електромагнітних характеристик родопсину, на підставі яких запропоновано нову теорію спектрального налаштування зорового аналізатора, що ґрунтується на принципі виникнення резонансу, наявного у людському організмі як засобу виділення та підсилення інформації, що надходить із довкілля. За допомогою запропонованої моделі проведено розрахунки можливої кількості кольоровідчуття людським оком в умовних діапазонах частот. Вивчено проблему суб'єктивного відчуття швидкості сприйняття інформації, що передається від ока до центральної нервової системи (ЦНС). Виконано розрахунки моделі сальтаторного проведення потенціалу в нервовому волоконі. Запропоновано електромагнітну теорію сприйняття світла зором аналізатором людини. Розроблено математичну модель передачі інформації в мозок та її ідентифікації. Запропоновано гіпотезу об'ємного сприйняття органами зору і ЦНС зовнішньої інформації. На підставі теоретичних результатів цієї роботи можуть бути створені прилади, які допоможуть розв'язати проблему протезування зору в осіб із його функціональним порушенням.

Більшість теоретичних робіт, присвячених обробці інформації про вплив світла на органи зору, ґрунтується на його корпускулярних властивостях без урахування особливостей електромагнітної природи світла.

Розглянуто модель сприйняття світла людським зором, яка ґрунтується на наявних доведених фізичних характеристиках і фізіологічних особливостях сприйняття оком електромагнітної світлової енергії. Насамперед це довжина хвилі видимого світла, яка знаходиться в діапазоні від 400 до 750 нм, та пов'язана із цим енергія світлового потоку, на яку реагує око.

**Мета:** створити електромагнітну модель розпізнання людиною світлової інформації, яку вона отримує у видимому діапазоні світла, що дає змогу строго та на підставі розрахунків довести її спроможність, а також моделі електронних схем, які ілюструють, як простими з'єднаннями палички та колбочки можуть забезпечити її реалізацію, і на їхній основі запропонувати гіпотезу про передачу перетвореної інформації в режимі реального часу в ЦНС, а також гіпотезу об'ємного сприйняття зором аналізатором та ЦНС зовнішньої інформації.

#### Матеріали і методи

Проведено математичне моделювання апроксимації даних у біології та медицині числових значень параметрів за експериментальними даними, сукупності формул і рівнянь, що описують властивості досліджуваного об'єкта і дають змогу встановити кількісні співвідношення між ними.

#### Результати та їх обговорення

Відомо, що людське око сприймає світлову інформацію за допомогою рецепторів, розташованих у сітківці, – паличок та колбочок. Це спеціалізовані нервові клітини, здатні генерувати електричні сигнали під час потрапляння світла.

Відповідно до третього закону фотоефекту для кожного матеріалу існує така гранична частота, що випромінювання меншої частоти, якою б не була інтенсивність випромінювання, що падає,

не спричиняє фотоефект. Цю мінімальну частоту називають червоною межею фотоефекту ( $\lambda_{\text{чер.}}$ ) [8]:

$$\lambda_{\text{чер.}} = \frac{ch}{A_{\text{вих}}},$$

$$A_{\text{вих}} = hf_{\text{min}},$$

де  $f_{\text{min}}$  – мінімальна частота випромінювання;

$A_{\text{вих.}}$  – робота виходу електронів;

$c$  – швидкість світла;

$h$  – стала Планка ( $4,135667669 \cdot 10^{-15}$  еВ/с).

Отже, червоною межею ока є 405 ТГц (740 нм), а весь діапазон частот – від червоного до фіолетового. Водночас енергія фотонів лежить у діапазоні від 1,97 до 2,75 еВ. Цей діапазон має умовний характер. У реальності кольори плавно переходять один в один.

Обчислимо середню енергію ( $BW_{\text{сер.}}$ ), яку сприймає око в усьому діапазоні:

$$BW_{\text{сер.}} = \frac{\Sigma_{\text{кр.}} + \dots \Sigma_{\text{ф.}}}{8} \approx 1,6875 \text{ еВ} \approx 1,7 \text{ еВ}$$

де  $\Sigma_{\text{к.}}$  – сума червоного випромінювання;  $\Sigma_{\text{ф.}}$  – сума фіолетового випромінювання.

У системі СІ енергію виражають в ерг/с:

$$1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ерг/с},$$

тобто середня чутливість становить

$$2,72 \cdot 10^{-12} \text{ ерг/с}.$$

Згідно із законом збереження енергії – це чутливість фотоприймача на секунду.

В останніх дослідження швидкості реакцій біохімічних перетворень родопсину під впливом фотоефекту виявлено, що вона дорівнює фемтосекундам, тобто  $10^{-15}$  с [9].

Чутливість ока за 200 фс становить  $544 \cdot 10^{-27}$  ерг/фс.

У роботах із фоточутливості ока раніше встановлено чутливість, що дорівнює  $10^{-10}$ – $10^{-11}$  ерг/с [10].

Такою незначною енергією тяжко здійснити складні біохімічні перебудови, суть яких полягає у зміні родопсину, реакції поглинання зорового пігменту – хромофору та його конфігурацій. Це перший факт, який ставить під сумнів, що лише біохімічна функція ретиналієвого хромофору є причиною «налаштування» спектральної чутливості зорового пігменту. Природа дуже складних перетворень остаточно невивчених процесів, що відбуваються в колбочках та паличках, відрізняється. Так, доведено, що опсини колбочок і паличок відрізняються. Попри значні досягнення в галузі вивчення складних біохімічних перетворень, пов'язаних із перетворенням 11-цис-ретиналієвого хромофору на його трансформулу, як фотохімічну реакцію в зорі строго не доводить, як відбувається процес виділення колірних спектрів видимого світла паличками та колбочками [11].

Ця теоретична модель ґрунтується на тому, що в результаті еволюції людини створено механізм, в основі якого лежить явище резонансу, що дає змогу вибірково підсилювати інформацію, яка надходить із довкілля. Наприклад, у вушній раковині завдяки її геометричним розмірам відбувається підсилення звуку залежно від його частоти [12]. Для аналізу

енергії світла, яке за частотою більше приблизно в 10 млн разів і на стільки ж слабше за потужністю, природою реалізований той самий принцип резонансу.

Для доведення цього слід розглянути низку питань, пов'язаних із молекулярною біофізикою.

Відповідно до теорії валентних зв'язків (В. Геймер і Ф. Лондон) доведено, що два електрони з протилежними спінами, що належать до двох атомів, дають перекриття хвильових функцій електронів і внаслідок цього між атомами виникає зона зі значною електронною щільністю, що призводить до зменшення потенційної енергії системи та утворення двохцентрового двоелектронного зв'язку (ковалентного). Такі зв'язки наявні у структурній молекулі родопсину (Рис. 1) [13].

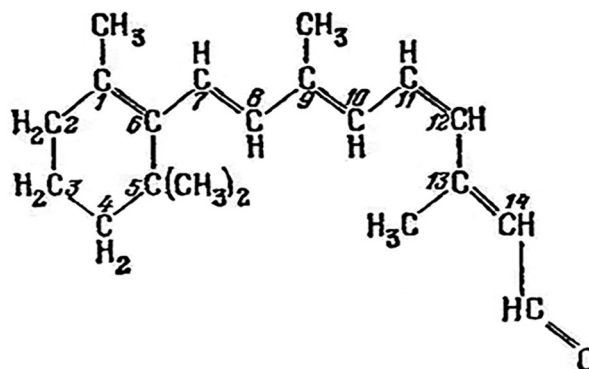


Рис. 1. Структурна молекула родопсину

Основною побудови молекули є структура  $\text{CH}_2$ , у якій головну енергетичну роль відіграє водень (спін атома Н –  $\frac{1}{2}$ , спін атома С – 0) [14].

Біохімічні процеси, що відбуваються в родопсині під дією світла, дають змогу з упевненістю стверджувати, що в момент його трансформації відбувається процес накопичення та перерозподілу енергії.

Індуктивність у загальному фізичному сенсі – це можливість речовини накопичувати енергію електромагнітного поля. У діамантиках, до яких можна віднести родопсин, це явище також наявне завдяки поляризації молекул.

Родопсин є діамантиком. Індукційна взаємодія між неполярною та полярною молекулами, що виникає під дією поля полярної молекули, має електромагнітну природу. Вона визначається дією електричних диполів молекул [15]:

$$B = \chi H,$$

де  $\chi$  – стала, набагато менша за 1.

$$U_{\text{ing}} = \frac{1}{(3,84^0)^6}$$

де  $U_{\text{ing}}$  – індуктивність.

Відомо, що індукційні зв'язки виникають під дією світлового впливу та припиняються після нього.

Розрахуємо індуктивність одного диска на підставі наявних даних (кількість молекул у диску та енергія,

яка відповідає за енергетичний баланс, що дорівнює 12,6 еВ).

$$W_M = \frac{B^2}{2\mu_0 M},$$

$$B = \sqrt{\frac{W_M}{2\mu_0 M}},$$

де  $W_m$  – магнітна потужність;  $B$  – магнітна індукція;  $\mu_0 = 12,56 \text{ Гн/м} \cdot 10^{-7}$ .

Нехай  $M = 1$ . З урахуванням значення енергії однієї молекули ( $3,2 \cdot 10^{37}$ ) отримаємо приблизне значення індуктивності однієї молекули  $3,65 \cdot 10^{-16} \text{ Гн}$ .

Оскільки в одному диску міститься близько  $8 \cdot 10^4$  молекул, індуктивність одного диска дорівнює близько  $28,48 \cdot 10^{-12} \text{ Гн}$ .

Установлено, що ємність біологічної мембрани становить близько  $0,9 \frac{\text{мкФ}}{\text{см}^2}$  [16].

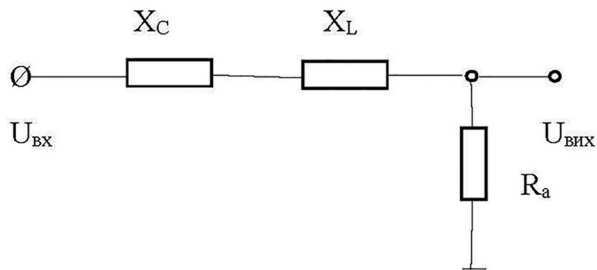
Розрахуємо ємність однієї молекули родопсину діаметром 4,2 нм:

$$S = \frac{3,14 \cdot 4,2^2}{4} \text{ нм} \approx 14,0 \text{ нм}^2 = 14 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2,$$

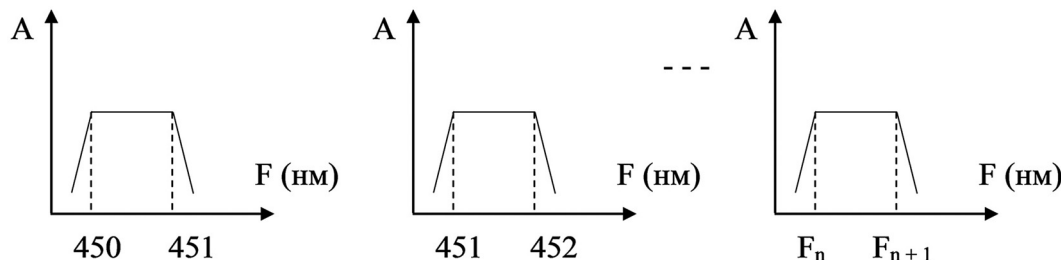
тоді  
ємність ( $C$ ) =  $14 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \cdot 0,9 \text{ мкФ/см}^2 = 12,6 \cdot 10^{-14} \text{ мкФ}$ .

Відповідно ємність 1 молекули становитиме близько  $14 \cdot 10^{-10} \text{ мкФ}$ .

В одному диску  $8 \cdot 10^4$  молекул.  
Ємність одного диска:  
 $14 \cdot 10^{-14} \text{ мкФ} \cdot 8 \cdot 10^4 = 112 \cdot 10^{-10} \text{ мкФ}$ .



**Рис. 2.** Схема фільтра:  $X_C$  – ємність паличок, колбочок;  $X_L$  – індуктивність паличок, колбочок;  $R_a$  – їхній активний опір



**Рис. 3.** Графічна характеристика фільтра

Розрахуємо комплексний опір однієї молекули родопсину за формулою Томсона:

$$X_L = 2\pi fL.$$

Якщо період швидкодії 200 фс, то отримаємо

$$X_L = 6,28 \cdot 0,005 \cdot 10^{15} \cdot 3,56 \cdot 10^{-16} = 112 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fL},$$

$$X_C = \frac{1}{6,28 \times 0,005 \times 10^{15} \times 112 \times 10^{-10}} = 0,28 \times 10^5 \text{ ом}.$$

На підставі теоретичних розрахункових даних можна припустити, що палички та колбочки, маючи певні електричні характеристики, можуть поєднуватися у вигляді схеми фільтрів, завдяки яким відбувається пропускання (виділення) із загального монохроматичного спектру лише певної частоти хвилі. На **Рис. 2** наведено схему такого фільтра, а на **Рис. 3** – графічна характеристика такого фільтра для умовного частотного діапазону.

Палички та колбочки можуть з'єднуватися послідовно, створюючи резонансні фільтри для частот усього видимого спектра світла. Визначимо кількість фільтрів. Для цього виберемо середню частоту у кожному діапазоні та крок квантування, який дорівнюватиме зміні енергії на одиницю частоти (**Табл. 1**).

Відомо, що палички здебільшого відповідальні за сприйняття яскравості освітлення. Слід визначити, скільки відтінків може розпізнати око в кожному умовному діапазоні спектра завдяки чутливості до інтенсивності світлового потоку. Для цього визначимо енергію всього світла, яке падає. Вона дорівнює 16,25 еВ. Сприйняття оком різного кольору нерівномірне. Визначимо кількість відтінків у кожному умовному діапазоні частот видимого спектра. Вона дорівнюватиме енергії всього спектру, поділеної на зміну енергії в кожному діапазоні (**Табл. 2**).

Проведені розрахунки виявили 1073 точок відліку на весь спектральний діапазон (**див. Табл. 2**).

Розрахуємо можливості енергетичного сприйняття паличками зміни світлового потоку. Для двохатомної молекули основна енергія дорівнює енергії водню ( $E = 4,4763 \text{ еВ}$ ) [17]:

$$4,4763 \cdot 3 \approx 12,6 \text{ еВ}.$$

Перерахуємо енергію молекули родопсину у вольтах:

$$U_B = \frac{1,6 \times 10^{-19} \cdot 12,6}{6,248 \times 10^8} = 3,2 \times 10^{-37} \text{ В}.$$

**Таблиця 1.** Спектральні характеристики видимого світла

Умовні позначення кольору	Середня частота діапазону, нм	Енергія діапазону, еВ	Зміна енергії в діапазоні, еВ	Мінімальна кількість фільтрів
Ф	450	≤2,75	0,17	2647
С	465	2,58–2,75	0,17	2735
Б	495	2,43–2,58	0,15	3300
З	530	2,25–2,43	0,18	2944
Ж	582	2,10–2,43	0,33	1763
П	600	1,97–2,10	0,13	4615
Ч	610	≥1,97	0,13	4692

**Таблиця 2.** Кількість відтінків кольору

Середня частота умовного діапазону, нм	Зміна енергії в діапазоні, еВ	Мінімальна кількість відтінків у діапазоні
450	0,17	95
465	0,17	95
495	0,15	108
530	0,18	90
582	0,07	232
600	0,13	125
610	0,13	125

Один диск містить  $8 \cdot 10^4$  молекул родопсину, до складу однієї палички входить близько  $10^3$  дисків, а в оці міститься близько  $10^8$  паличок. З огляду на наведені дані зрозуміло, що цього недостатньо, щоб на гангліозній клітині під дією світла виник потенціал близько 60–70 мВ. Для цього слід створити такі фізичні умови, які дадуть змогу паличкам передати через біполярні та гангліозні нейрони у мозок потенціал 60–70 мВ.

Фізичний метод, що дає змогу отримати необхідний потенціал – це резонанс напруг, який може бути реалізований в оці людини послідовним з'єднанням паличок за відомою схемою (**Рис. 4**). Відповідно до теоретичних розрахунків резонанс у ланцюгу настає тоді, коли коливання контуру збігаються з частотою коливання зовнішнього сигналу.

Розрахуємо швидкість проведення інформації в головний мозок. У середньому довжина зорового нерва становить 0,045 м (45 мм). Оскільки відповідно до відчуття людина суб'єктивно бачить практично миттєво, виберемо максимальну відому швидкість проведення інформації по нервовому волокну – 120 м/с. Час проведення сигналу становитиме 0,000375 с (0,374 мс). Якщо врахувати час, необхідний для

обробки сигналу в ЦНС, це великий час, який не спостерігається в реальності.

Розв'язання проблеми полягає у сальтаторному проведенні сигналу по нервовому волокну, який реалізований природою завдяки мієлінізованим оболонкам гангліозних клітин [18]. Модель такого волокна можна представити у вигляді конденсаторів, з'єднаних послідовно. Потенціал передається по гангліозній клітині завдовжки 45 мм, яка має близько 30 перетяжок Ранв'є по всій довжині (відстань між перетяжками 1–2 мм) [19]. Тоді час заряду (Т) дорівнюватиме

$$T = RC,$$

де С – ємність, що дорівнює ємності однієї перетяжки;

R – середній опір (35 Ом/см<sup>2</sup>).

Ємність перетяжки Ранв'є (С) розрахуємо за формулою плоского конденсатора:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S/D,$$

де  $\epsilon = 1$ ;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

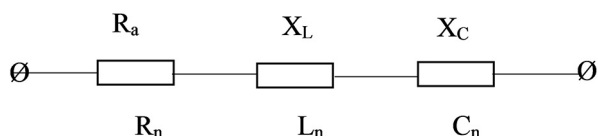
S =  $1,6 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup> – площа перетяжки Ранв'є;

D – товщина гангліозної клітини (1,5 мкм : 2 = 0,75 мкм).

Підставивши значення, отримаємо:

$$C = 18 \cdot 10^{-18} \text{ Ф.}$$

$$T = 35 \text{ Ом/мкм}^2 \cdot 10^8 \cdot 18 \cdot 10^{-18} \text{ Ф} = 630 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$



**Рис. 4.** Схема резонансного контуру:  $R_a$  – активний опір паличок;  $X_L$  – індуктивний опір паличок;  $X_C$  – ємнісний опір паличок



Отже, швидкість проведення потенціалу по всьому нервовому волокну становитиме близько 190 нс, якщо врахувати, що вздовж гангліозної клітини розташовано близько 30 перетяжок Ранв'є. Цей час проведення потенціалу набагато ближчий до реальних суб'єктивних відчуттів.

Очі людини можна уявити у вигляді джерела оптичної інформації, що перетворює одночасно електромагнітні коливання по спектру та інтенсивності в електричні імпульси, які надходять до ЦНС [20]. Відповідно до теорії інформації, за будь-якої продуктивності джерела повідомлень, яка буде меншою, ніж продуктивна здатність каналу, існує точний спосіб кодування, що дає змогу забезпечити передачу всієї інформації, створеної джерелом, із якою завгодно малою ймовірністю помилки [21]. Уявімо інформацію, що передається, у вигляді функції, що охоплює на кінцевий момент  $T$  кінцеве число точок. Функцію у дискретному вигляді можна зобразити у вигляді таблиці нейронів, з'єднаних між собою не довільно, а у вигляді сполук, які дають змогу передати всю інформацію, що надходить від очей таким чином, що з окремих точок вийде смислова інформація, яка відповідає вихідній.

Запишемо значення інформації, яка надходить у результаті розкладання спектральної складової видимого спектра, що показує стан нейронів у вигляді квадратичної матриці за простим принципом: є інформація – «1», немає – «0». Наприклад, розпишемо для фіолетової частини спектру матрицю, в який наведемо вихідні значення (**Рис. 5**):

$$\text{через } (a) \quad - \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ \square & \square & & & \square \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \square & \square & & & \square \end{vmatrix}$$

$$\text{за інтенсивністю } (b) \quad - \quad \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1n} \\ \square & \square & & & \square \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2n} \\ \square & \square & & & \square \end{vmatrix}$$

**Рис. 5.** Спектральна матриця

Тоді згідно із законом перемноження матриць результатом буде

$$A1 \cdot B1 = AB.$$

Отриманий результат показує на кожен момент часу стан інформації, що надходить з ока в ЦНС.

Відповідно до теорії кодування інформації [22] інформаційна адекватність  $T < 1/2Fn$ ,

де  $T$  – період дискретизації;

$F_n$  – найвища частота спектру сигналу  $F(T)$ .

Інформація, отримана з двох незалежних джерел, дорівнює сумі кількості інформації, отриманої від кожного джерела ( $N1+N2$ ), а запропонована міра кількості інформації – добутку ( $N1 \cdot N2$ ):

$$N1 + N2 \quad N1N2 \\ N = m + M \times M = N1 \times N2,$$

де  $M$  – кількість інформації від джерела;  $N1, N2$  – кількість можливих повідомлень від двох джерел.

Продуктивність джерела повідомлень ( $P$ ) – це середня кількість інформації, що генерується джерелом за одиницю часу:

$$p = 1/t,$$

де  $t$  – довжина повідомлення.

Інформаційна ємність повідомлення ( $R$ ) – це середня кількість інформації, що міститься в повідомленні однієї тривалості:

$$R = I/t,$$

де  $I$  – кількість інформації;  $t$  – довжина повідомлення.

Швидкість створення (генерації) інформації ( $Q$ ) розраховують за формулою

$$Q = W \cdot H,$$

де  $W$  – швидкість передачі сигналу;  $H$  – середня кількість інформації, що припадає на 1 біт символу.

Так, інформаційна ємність двійкового дискретного повідомлення чисельно дорівнює смузі частот сигналу, за допомогою якого передаються символи повідомлення, виражені в герцах.

З теореми Котельникова випливає, що будь-яке безперервне повідомлення  $R(T)$  тривалістю  $T$  з верхньою граничною частотою в спектрі  $F_m$  може бути представлене послідовністю рівновіддалених миттєвих значень цього повідомлення, взятих з інтервалом [23]

$$\Delta t = \frac{1}{2F_m}$$

Якщо прийняти за джерело інформації один фільтр, то середня кількість інформації від одного фільтра дорівнюватиме кількості фільтрів на один діапазон, поділений на швидкодію молекули родопсину ( $F$ )

$$F = 1/t = 1/200 \cdot 10^{-15} \text{ с, або } 5 \text{ ТГц.}$$

Визначимо, скільки ліній передачі інформації припадає на один фільтр, де 2647 – кількість фільтрів на один умовний діапазон (22 696 – загальна кількість фільтрів):

$$2647 \times 1,2 \times 10^5 / 22696 = \frac{2647 \times 1,2 \cdot 10^5}{22696} = 0,3 \times 10^5 \text{ (ліній).}$$

Тоді частота перетворення одного фільтра в умовному діапазоні дорівнює

$$790 \text{ ТГц:}2647 \text{ фільтрів} = 0,3 \text{ ТГц.}$$

Визначимо пропускну здатність 1 лінії (зорового нерва):

$$0,3 \text{ ТГц} : (0,3 \cdot 10^5) = (0,3 \cdot 10^{12}) : (0,3 \cdot 10^5) = 1 \cdot 10^7 \text{ імп/с} = 0,5 \text{ Мбіт/с.}$$

Для різних умовних діапазонів частот пропускну здатність буде різною, але не більшою за розраховану для найвищої частоти ультрафіолетового діапазону.

Особливе місце в дослідженнях механізму роботи зорового аналізатора відведене поясненню процесу об'ємного сприйняття зовнішнього середовища. Процес сприйняття зором людини реального тривимірного простору неможливо пояснити, ґрунтуючись на прямолінійних законах поширення світла у вигляді корпускул, які рухаються зі швидкістю світла. Лише електромагнітна теорія, що описує процеси зміни довжини хвилі під час зображення хвиль і під час огинання ними перешкод, дає розуміння того, яким чином відбувається сприйняття оком, а надалі – інтерпретація в ЦНС довкілля в реальному вигляді. В основі цього припущення лежить теорія Гюйгенса-Френеля, згідно з якою кожен елемент хвильового фронту можна розглядати як центр вторинного збурення, що породжує вторинні сферичні хвилі, а результуюче світлове поле в кожній точці простору визначатиметься інтерференцією цих хвиль [24].

У цій роботі немає потреби наводити математичні докази, які пояснюють природу фізичних явищ, оскільки їх отримано понад 200 років тому.

Можна припустити, що сприйняття зоровим аналізатором людини реального тривимірного простору відбувається в результаті виникнення резонансу коливань унаслідок явищ дифракції та інтерференції, які реєструються в сітківці людини за зміною обвідних (кривих) довжин хвиль і амплітудою їхніх значень.

### Висновки

1. Побудовано електромагнітну теорію кольоросприйняття зоровим аналізатором людини світлової інформації.

2. Наведено розрахунки електрофізіологічних параметрів молекул родопсину, що входять до складу паличок. На цій основі розроблено модель резонансного сприйняття зором людини електромагнітних коливань видимого діапазону світла.

3. Розрахунки на основі розробленої моделі перетворення інформації видимого світлового діапазону електромагнітного спектру дали змогу точніше визначити кількість відтінків кольорів, які розрізняє людське око.

4. Запропоновано математичну модель, яка описує передачу в ЦНС інформації про спектр та інтенсивність електромагнітного сигналу видимого діапазону спектру, перетвореного очима.

5. Розраховано швидкість передачі інформації в зоровому нерві.

6. Запропоновано гіпотезу об'ємного сприйняття зоровим аналізатором та ЦНС зовнішньої інформації.

7. Практичним застосуванням розробленої моделі можуть бути побудовані на її основі прилади, які дадуть змогу відновити зір, а також прилади для корекції функції зору.

### Розкриття інформації

#### Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

### Список літератури

1. Дорфман ЯГ. Всемирная история физики с древнейших времен до конца XVIII века. Москва: Наука; 1974.
2. Дорфман ЯГ. Всемирная история физики. С начала XIX до середины XX века. Москва: Наука; 1979.
3. Островский МА, Фельдман ТБ. Химия и молекулярная физиология зрения: светочувствительный белок родопсин. Успехи химии. 2012;81(11):1071-90. doi: 10.1070/RC2012v081n11ABEN004309
4. Фельдман ТБ, Островский МА. Фотобиология и фотохимия первичных процессов зрения. Дубна: Университет Дубна; 2009.
5. Рубин АБ. Фотопревращения бактериородопсина и родопсина. В книге: Биофизика. Т. 2. Москва: Наука; 2004. С. 388-424.
6. Palczewski K. G protein-coupled receptor rhodopsin. Annu Rev Biochem. 2006;75:743-67. doi: 10.1146/annurev.biochem.75.103004.142743. PMID: 16756510; PMCID: PMC1560097.
7. Островский МА. Молекулярная физиология зрительного пигмента родопсина. Биологические мембраны. 2012;29(1-2):38.
8. Яворский БМ, Детлаф ЛА, Лебедев АК. Справочник по физике. Москва: Мир образования; 2006.
9. Островский МА. Молекулярная физиология зрения: полвека исследований. Сенсорные системы. 2015;29(4):276-88.
10. Okada T, Ernst OP, Palczewski K, Hofmann KP. Activation of rhodopsin: new insights from structural and biochemical studies. Trends Biochem Sci. 2001 May;26(5):318-24. doi: 10.1016/S0968-0004(01)01799-6. PMID: 11343925.
11. Хьюбел Д. Глаз, мозг и зрение. Москва: Мир; 1990.
12. Полищук АВ, Педаченко АЕ. Математическая модель преобразования, распознавания и запоминания звуковой информации человеком. Отоларингология. 2020;(5-6):64-70.
13. Кантор Ч, Шиммель П. Биофизическая химия. Москва: Мир; 2009.
14. Скоков ВН, Виноградов АВ, Решетников АВ, Коверда ВП. Стохастический кризисный резонанс в резонансном механизме обусловлен периодом тепловыделения. Теплофизика высокой температуры. 2016;54(3):366-70.
15. Бейдер Р. Атомы в молекулах. Квантовая теория. Москва: Мир; 2001.
16. Рубин АБ. Биофизика. Москва: Московский университет; 2004.
17. Хьюбер К, Герцберг Г. Константы двухатомных молекул. Москва: Мир; 1984.
18. Ануфриенко СЕ, Мац АС. Модель сальтаторного проведения возбуждения по разветвляющемуся нервному волокну. Моделирование и анализ информационных систем. 2007;14(2):24-6.
19. Эккерт Р, Рэндалл Д, Огастин Д. Физиология животных, механизмы и адаптация. Москва: Мир; 2004.
20. Ноздрачева АД, редактор. Начала физиологии. Санкт-Петербург: Лань; 2001.
21. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. Москва: Позвольте мне распечатать; 2013.
22. Леонтьев ВК, Тордиев ЭН. Комбинаторные аспекты теории информации. Москва: МФТИ; 2019.
23. Исферов ВН, Осипова ВА. Курс дискретной математики. Москва: МАИ; 2013.
24. Литвинов ОС, Павлов КБ, Горелик ВС. Физика в техническом университете. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2006.

**Коментарі****до статті Поліщука О.В., Тиханової О.Ф. «Біофізичні аспекти електромагнітної теорії сприйняття зором людини світлової інформації видимого діапазону»**

Зір – один з найважливіших органів чуття людини, оскільки зоровий аналізатор дає 90% інформації, що надходить до мозку від усіх рецепторів. Він еволюційно пристосований до сприйняття видимого світла – вузької частини діапазону електромагнітного випромінювання (від 400 до 800 нм).

Зоровий аналізатор людини складається із периферичної, провідникової та центральної частин. Сприйняття оком світла та наступне перетворення і проведення по структурах зорової системи – складний процес, вивчення якого триває.

Стаття є актуальною, оскільки присвячена розробці теорії сприйняття людським зором електромагнітного випромінювання видимого діапазону.

Авторами проаналізовано теорії світла і кольору, фізичні властивості електромагнітної природи світла та запропоновано електромагнітну модель розпізнання людиною світлової інформації, яку вона отримує у видимому діапазоні світла.

Безперечно, сильною стороною статті є поглиблені розрахунки електрофізіологічних параметрів молекул родопсину, що входять до складу паличок, і на цій основі розроблено модель резонансного сприйняття людським оком електромагнітних коливань видимого діапазону світла.

Запропоновано математичну модель, яка описує передачу в ЦНС інформації про спектр та інтенсивність електромагнітного сигналу видимого діапазону.

Розраховано швидкість передачі інформації в зоровому нерві та запропоновано гіпотезу об'ємного сприйняття зоровим аналізатором і ЦНС зовнішньої інформації. Згідно з отриманими даними, припускається, що сприйняття зоровим аналізатором тривимірного простору відбувається в результаті виникнення резонансу коливань унаслідок явищ дифракції та інтерференції, які реєструються в сітківці людини за зміною обвідних (кривих) довжин хвиль і амплітуди їхніх значень.

Представлені у статті дані поглиблюють і доповнюють існуючі теорії сприйняття людським зором світлової інформації та є базою для подальших досліджень у цьому напрямі.

За актуальністю, змістом, наведеними положеннями та висновками стаття може бути рекомендована до друку у наукових виданнях.

*Доктор медичних наук В.А. Васюта  
Інституту нейрохірургії  
ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України*

У теоретичній статті розглянуто актуальні питання про сприйняття зором людини електромагнітного випромінювання видимого світлового спектрального діапазону. Проаналізовано експериментальні дослідження у галузі біофізики зору, теорії електромагнітних коливань світла, сучасні уявлення про властивості молекулярного магнітного резонансу, а також теорії передачі інформації. Незважаючи на велику кількість результатів експериментальних і теоретичних досліджень, опублікованих за даною тематикою, багато питань, пов'язаних із суворим доказом механізмів сприйняття людиною, наприклад, колірної інформації, а також подальшим перетворенням оком людини світлової інформації у відповідний електричний сигнал, залишаються остаточно не вивченими через велику складність проведення прямих досліджень *in vivo*. Тому теоретичні розробки у цьому напрямі вважаю актуальними.

Авторами наведено теоретичні розрахунки діелектричних властивостей родопсину та запропоновано гіпотезу про резонансну взаємодію паличок і колб і на цій основі наведено розрахунки кількості кольорів, що розпізнаються оком. Запропоновано модель, яка описує швидкодію проведення інформації по зоровому нерву і математичний закон передачі зорової інформації в центральну нервову систему людини.

Останній розділ статті присвячений сприйняттю людиною об'ємної інформації, що ґрунтується на математичних законах дифракції та когерентності електромагнітного випромінювання, однак авторами не наведено чітких фізіологічних доказів цього твердження.

Практичним застосуванням розробленої моделі, описаної в статті, можуть бути побудовані на її основі прилади, які дають змогу відновити зір, а також прилади для корекції функції зору.

*Доктор біологічних наук,  
професор О.В. Колісніченко  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України*