УДК 681.7:616-71

О. С. Швидюк
Н. І. Заболотна

АНАЛІЗ МОДЕЛЬНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ БАГАТОХВИЛЬОВОЇ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ БАГАТОШАРОВИХ ТКАНИН

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі аналізуються модельні підходи для багатохвильової поляриметричної діагностики багатошарових біологічних тканин. Розглядається метод Монте-Карло як інструмент для точного моделювання транспорту поляризованого світла на основі макроскопічних оптичних параметрів тканини. Представлено структурно-біомеханічну модель С. Ковіна, що описує тканину як ієрархічний композитний матеріал, пояснюючи походження її оптичних властивостей, зокрема анізотропії, через мікроструктурну організацію. Визначено перевагу моделі Ковіна, що полягає у встановленні зв'язку між біологічною структурою тканини та її оптичними властивостями.

Ключові слова: *метод Монте-Карло, модель Ковіна, поляриметрична діагностика, багатошарова тканина*

Вступ

Багатохвильова поляриметрична діагностика представляє собою перспективний напрямок неінвазивного дослідження біологічних тканин, однак інтерпретація отримуваних даних є складним завданням через комплексний характер взаємодії поляризованого світла зі складною, багатошаровою та оптично неоднорідною структурою біологічних об'єктів. Для вилучення діагностично значущої інформації про мікроструктурні зміни та функціональний стан тканин необхідне залучення адекватних теоретичних моделей. Серед ключових підходів, що використовуються в цій галузі, виділяються метод Монте-Карло для моделювання транспорту випромінювання [1] та структурно-біомеханічна модель будови тканини, розроблена Стівеном Ковіном[2].

Метою даної роботи є детальний розгляду обох моделей, їх інтеграції та порівняльній оцінці їхнього внеску в розвиток поляриметричної діагностики.

Результати досліджень

Метод Монте-Карло є потужним стохастичним чисельним інструментом, що дозволяє симулювати поширення світла в розсіювальних середовищах шляхом відстеження траєкторій великої кількості індивідуальних фотонних пакетів. Цей підхід безпосередньо моделює фундаментальні фізичні процеси: поглинання, багаторазове розсіяння та явища на межах розділу шарів. Кожен шар тканини в моделі Монте-Карло характеризується набором макроскопічних оптичних властивостей – коефіцієнтами поглинання (μ_a) та розсіяння (μ_s), показником заломлення (n) та параметром анізотропії розсіяння (g), які залежать від довжини хвилі випромінювання. Важливою перевагою підходу Монте-Карло є його гнучкість: модель легко адаптується для врахування зміни стану поляризації світла. Шляхом відстеження вектора Стокса для кожного фотонного пакету та застосування відповідних матриць Мюллера при кожному акті розсіяння та на межах розділу, метод Монте-Карло дозволяє розраховувати просторові та кутові розподіли не тільки інтенсивності, але й усіх поляризаційних параметрів відбитого та пропущеного випромінювання. Така здатність до точного моделювання сигналів у складних геометріях та з урахуванням поляризації робить метод Монте-Карло "золотим стандартом" для симуляції транспорту світла в біотканинах. Однак, метод має й суттєві обмеження: висока обчислювальна вартість, пов'язана з необхідністю симуляції мільйонів фотонів для досягнення прийнятного рівня статистичного шуму, та феноменологічний характер вхідних параметрів. Модель Монте-Карло, хоча

й точно описує поширення світла для заданих μ_a, μ_s, g, n, сама по собі не розкриває зв'язку цих макроскопічних властивостей з реальною мікроструктурою біологічної тканини.

На противагу моделі Монте-Карло, модель Стівена Ковіна фокусується не на транспорті світла, а на фундаментальній структурі та біомеханіці самої біологічної тканини. Ковін розглядає тканини як ієрархічно організовані композитні матеріали, що складаються з клітин та позаклітинного матриксу (ПМ) [2]. Саме ПМ, що включає впорядковані волокнисті структури (переважно колаген та еластин) та аморфну основну речовину (протеоглікани, вода), значною мірою визначає як механічні, так і оптичні властивості тканини. Ключовим елементом є ієрархічна організація колагену – від молекул тропоколагену до мікрофібрил, фібрил та волокон, що формують складну мережу. Ця впорядкована волокниста структура, занурена в аморфну матрицю, може бути концептуально представлена як аналог двокомпонентної аморфно-кристалічної системи, де саме "кристалічна" (волокниста) фаза відповідає за анізотропні властивості. Ковін також підкреслює динамічну природу тканини, її здатність до морфогенезу, росту, адаптації та ремоделювання у відповідь на біохімічні сигнали та механічні навантаження, включаючи процеси молекулярного та супрамолекулярного самозбирання, що можуть нагадувати формування рідкокристалічних структур. Перевагою цієї моделі є її фізична та біологічна обґрунтованість, здатність пояснити походження оптичної анізотропії (зокрема, двопроменезаломлення колагену) та встановити прямий зв'язок між структурними змінами (напр., деградацією чи надмірним накопиченням колагену при патологіях) та властивостями тканини. Проте, модель Ковіна сама по собі не описує поширення світла і її кількісне застосування для визначення оптичних параметрів є складним.

Очевидно, що для цілей поляриметричної діагностики моделі МК та Ковіна є взаємодоповнюючими. Модель Монте-Карло надає інструмент для симуляції вимірюваного сигналу на основі ефективних оптичних параметрів, тоді як модель Ковіна пояснює фізичне походження цих параметрів через мікроструктурну організацію тканини. Однак, при оцінці їхнього відносного внеску саме в діагностичний процес, переваги структурного підходу Ковіна стають особливо виразними.

Ключова цінність моделі Ковіна полягає в наданні фізичної та біологічної інтерпретації даним, отриманим як експериментально, так і за допомогою симуляцій за методом Монте-Карло. Без розуміння внутрішньої структури, результати поляриметрії залишаються набором кореляцій між оптичними параметрами та станом тканини. Модель Ковіна дозволяє перевести ці кореляції на мову конкретних мікроструктурних змін: зміни в щільності, діаметрі, ступені впорядкованості та орієнтації колагенових волокон, співвідношенні волокнистої та аморфної фаз. Саме ці структурні особливості, описані Ковіном, є першопричиною спостережуваних поляризаційних ефектів (двопроменезаломлення, дихроїзму, специфічної деполяризації), і розуміння цих механізмів є ключовим для вилучення діагностичної інформації. Більше того, оскільки патологічні процеси нерозривно пов'язані зі структурними перебудовами ПМ, модель Ковіна створює прямий міст між вимірюваними поляриметричними сигналами та діагностикою захворювань.

Отже, хоча метод Монте-Карло залишається незамінним для кількісного розрахунку поширення поляризованого світла в біотканинах, саме структурна модель Ковіна надає концептуальну основу та фізичний зміст, необхідні для перетворення результатів вимірювань та симуляцій на значущу діагностичну інформацію. Вона пояснює походження оптичних властивостей та поляризаційних ефектів через реальну мікроструктуру тканини, що є ключовим для розвитку поляриметричної діагностики як інформативного інструменту для оцінки стану багатошарових біологічних тканин.

Висновки

У роботі проаналізовано два підходи до моделювання в поляриметричній діагностиці: метод Монте-Карло та модель Стівена Ковіна. Метод Монте-Карло дозволяє точно симулювати поширення поляризованого світла в тканинах, однак не пояснює походження оптичних параметрів. Натомість модель Ковіна, ґрунтуючись на мікроструктурній будові тканин, дає фізичну інтерпретацію поляризаційних ефектів.

Модель Ковіна є ключовою для встановлення зв'язку між змінами структури тканин та поляриметричними сигналами, що робить її важливим інструментом у розвитку сучасної багатохвильової поляриметричної діагностики багатошарових біологічних тканин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang L.-H., Jacques S.L. Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-layered Tissues in Standard C. University of Texas, M. D. Anderson Cancer Center, 1992. 173 p.
2. Cowin S.C. How is a tissue built? Journal of Biomedical Engineering. 2000. V.122. Issue 6. P. 553-568.

Швидюк Олег Сергійович **–** аспірант, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: olehshvydiuk@gmail.com

Заболотна Наталія Іванівна **–** д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, E-mail: natalia.zabolotna@gmail.com

ANALYSIS OF MODELING APPROACHES FOR MULTIWAVELENGTH POLARIMETRIC DIAGNOSTICS OF MULTILAYER TISSUES

Abstract

The paper analyzes modeling approaches for multiwavelength polarimetric diagnostics of multilayer biological tissues. The Monte Carlo method is considered as a tool for accurate modeling of polarized light transpiration based on macroscopic optical parameters of the tissue. The structural and biomechanical model of S. Covin is presented, which describes the tissue as a hierarchical composite material, explaining the origin of its optical properties, in particular anisotropy, through the microstructural organization. The advantage of the Covin model is determined, which is to establish a connection between the biological structure of the tissue and its optical properties.

Keywords: Monte Carlo method, Cowin model, polarimetric diagnostics, multilayer tissue

Oleh Shvydiuk S. **–** postgraduate, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: olegshvydiuk@gmail.com

Zabolotna Natalia I. - Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: natalia.zabolotna@gmail.com