

С.А. Терещенко, С.А. Титенок

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФFUЗИОННОЙ И ОСЕВОЙ МОДЕЛЕЙ ПРОХОЖДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ БИОЛОГИЧЕСКИЙ РАССЕИВАЮЩИЙ СЛОЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Аннотация

На основе данных, полученных методом Монте-Карло, проведено сравнение моделей прохождения лазерного излучения через биологический рассеивающий слой: нестационарной осевой модели (НОМ), классической диффузионной модели (КДМ) и уточненной диффузионной модели (УДМ). Обнаружено, что НОМ дает значения коэффициента рассеяния, близкие к редуцированному коэффициенту рассеяния, а не к полному коэффициенту рассеяния, несмотря на то, что в НОМ понятия редуцированного коэффициента рассеяния нет. Сделан вывод о предпочтительности УДМ по сравнению с КДМ.

Моделирование методом Монте-Карло (ММК) применяется для решения множества научных задач, связанных с изучением протекания сложных процессов [1]. Распространение оптического излучения через сильнорассеивающую среду (СРС) является именно такой задачей [2], [3]. В области биомедицинских исследований в качестве СРС выступают биологические ткани, для исследования которых целесообразно применять лазерное излучение ближнего ИК-диапазона, способное достаточно глубоко проникать в биоткань благодаря тому, что этот диапазон излучения входит в так называемое окно прозрачности [4].

Взаимодействие оптического излучения с биотканью в ИК-диапазоне характеризуется двумя параллельно протекающими процессами – поглощения и рассеяния, причем вероятность рассеяния больше вероятности поглощения на 1-2 порядка. Оптическими характеристиками СРС являются коэффициент поглощения и индикатриса рассеяния, определяющая вероятность рассеяния на разные углы. Одновременное нахождение этих двух величин по результатам измерений прошедшего через рассеивающий слой излучения является слишком сложной задачей. Поэтому вместо индикатрисы рассеяния находят более простую величину – коэффициент рассеяния.

Одним из подходов к экспериментальному определению указанных величин является использование лазерных импульсов ультракороткой длительности с последующей регистрацией временного распределения (ВР) фотонов, прошедших через СРС. Аналитически процесс прохождения импульсного излучения через СРС описывается нестационарным уравнением переноса излучения (УПИ). При этом оптические характеристики среды входят в УПИ в виде коэффициентов при функции плотности потока фотонов. Вследствие того, что интегро-дифференциальное УПИ не имеет аналитического решения в общем случае, используют приближенные подходы с дополнительными допущениями. Наиболее часто применяют две модели – диффузионную, для которой существуют различные варианты [5], [6], и нестационарную осевую [7].

Следует отметить, что существенной проблемой является различие численных значений оптических

характеристик, полученных при использовании разных моделей, но для одного и того же исследуемого слоя СРС. Этот эффект обусловлен разным набором исходных допущений, лежащих в основе каждой модели [8]. Целесообразно сравнить рассматриваемые модели в контролируемых условиях при известных значениях оптических характеристик СРС. Такие условия обеспечивает моделирование методом Монте-Карло.

В основе ММК лежит моделирование траекторий отдельных фотонов при заданных значениях оптических характеристик СРС. В результате для короткого импульса лазерного излучения можно получить временное распределение фотонов, попавших на детектор. Сравнение численных значений оптических характеристик, заданных в ММК, с результатами, полученными на базе известных моделей описания прохождения оптического излучения через СРС по временным распределениям, смоделированным с помощью ММК, позволит оценить возможности каждой из моделей в задаче определения оптических характеристик по экспериментальным временным распределениям для реальных образцов.

Теория

Траектория распространения фотона через СРС определяется изменением направления его движения после каждого акта рассеяния. Для изотропной однородной СРС дифференциальный по углам коэффициент рассеяния излучения (индикатриса рассеяния) $\mu_s(\vec{\Omega}\vec{\Omega}')$ определяет вероятность рассеяния фотона из направления движения $\vec{\Omega}$ в телесный угол $d\Omega'$ вблизи направления $\vec{\Omega}'$ при прохождении пути dl :

$$dP_s = \mu_s(\vec{\Omega}\vec{\Omega}') dl d\Omega'.$$

Определим коэффициент рассеяния как

$$\mu_s = \oint_{4\pi} \mu_s(\vec{\Omega}\vec{\Omega}') d\Omega'. \quad (1)$$

Коэффициенты поглощения μ_a , рассеяния μ_s и экстинкции $\mu = \mu_a + \mu_s$ представляют собой макроскопические оптические характеристики СРС. Кроме того, определяют фактор анизотропии g как средний косинус угла рассеяния:

$$g = \langle \cos \psi \rangle = \frac{\iint_{4\pi} \vec{\Omega} \vec{\Omega}' \mu_s(\vec{\Omega} \vec{\Omega}') d\Omega'}{\iint_{4\pi} \mu_s(\vec{\Omega} \vec{\Omega}') d\Omega'}, \quad (2)$$

где угол рассеяния ψ определяется из скалярного произведения векторов $\vec{\Omega}$ и $\vec{\Omega}'$:

$$\vec{\Omega} \vec{\Omega}' = \cos \psi.$$

Регистрируя время прихода каждого фотона на детектор, можно получить временное распределение (ВР) фотонов. Определить оптические характеристики однородного рассеивающего слоя СРС по результатам измерения ВР можно следующим образом. Луч лазерного импульсного излучения направляется перпендикулярно исследуемому слою, и регистрируется временное распределение $T(l, t)$ прошедшего через рассеивающий слой импульса на оси луча (рис. 1). Затем по экспериментальному временному распределению можно определить оптические характеристики СРС на основе известных моделей [8].

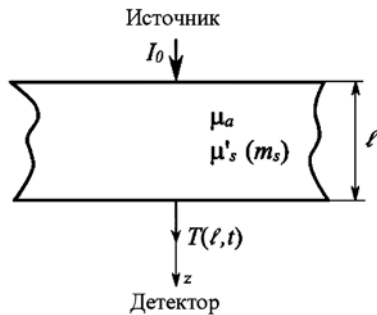


Рис. 1. Схема эксперимента по определению оптических характеристик слоя СРС

В настоящее время большинство исследователей используют классическую диффузионную модель (КДМ). В диффузионных моделях коэффициент рассеяния μ_s переходит в редуцированный коэффициент рассеяния $\mu'_s = \mu_s(1 - g)$, учитывающий анизотропию индикатрисы рассеяния. В КДМ для временного распределения фотонов, прошедших через рассеивающий однородный слой СРС, на оси источника (вдоль оси z) в полубесконечном приближении можно получить следующее выражение [5]:

$$T(z, t) = \frac{1}{2} U_0 (4\pi Dv)^{-3/2} t^{-5/2} \exp(-\mu_a vt) \times \left[(z - z_0) \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{4Dvt}\right) - (z + z_0) \exp\left(-\frac{(z + z_0)^2}{4Dvt}\right) \right], \quad (3)$$

где U_0 – исходная энергия импульса; $D = 3(\mu_a + \mu'_s)^{-1}$ – коэффициент диффузии; $z_0 = (\mu'_s)^{-1}$; v – модуль скорости света в среде; t – время. При сопоставлении выражения (3) с экспериментом считается, что оно описывает временное распределение фотонов, прошедших через слой толщины z .

В работе исследовалась также модификация диффузионной модели, названная уточненной диффузионной моделью (УДМ), в которой учитывалась

мононаправленность источника излучения [6]. В результате для УДМ в полубесконечном приближении на оси источника (вдоль оси z) выражение для временного распределения принимает вид

$$T(z, t) = \frac{3}{2} U_0 (4\pi Dvt)^{-3/2} \exp(-\mu_a vt) \times \exp\left(-\frac{z^2}{4Dvt}\right) \frac{(z^2 + zvt - 2Dvt)}{2vt^2}. \quad (4)$$

Исследовалась также недиффузионная модель, а именно нестационарная осевая модель (НОМ) [7]. Для НОМ справедливо следующее выражение для временного распределения рассеянных фотонов в однородной полубесконечной среде:

$$T(z, t) = 2U_0 \frac{\pi v m_s z}{\sqrt{(vt)^2 - z^2}} \eta(vt - z) \times I_1\left(m_s \sqrt{(vt)^2 - z^2}\right) \exp(-\mu vt), \quad (5)$$

где U_0 – исходная энергия импульса; $\mu = \mu_a + m_s$ – коэффициент экстинкции; $\mu(\bullet)$ – функция Хевисайда; $I_1(\bullet)$ – модифицированная функция Бесселя первого порядка.

Следует отметить, что НОМ описывает только фотоны, движущиеся вдоль оси исходного лазерного импульса, в то время как диффузионные модели описывают распространение фотонов во всем трехмерном объеме. С другой стороны, НОМ может описывать не только рассеянные, но и баллистические фотоны, в то время как диффузионные модели принципиально не способны описать баллистические фотоны, доля которых при исследовании тонких слоев достаточно велика. В формуле (5) баллистическое слагаемое опущено для облегчения сопоставления НОМ с диффузионными моделями.

Результаты

Было проведено моделирование прохождения лазерного излучения через СРС с помощью ММК при следующих параметрах: толщина слоя – 10 мм; $\mu_a = 0,002 \text{ мм}^{-1}$; $g = 0,75$; μ_s изменялся от 1,4 до 2,3 мм^{-1} с шагом 0,1 мм^{-1} . Для этих параметров среды были получены временные распределения, по полуширине и смещению которых с помощью КДМ, УДМ и НОМ были получены значения μ'_s и m_s (табл. 1). Для наглядности эти результаты представлены на рис. 2. Интересно, что значения m_s для НОМ близки к значениям редуцированного коэффициента рассеяния μ'_s , а не полного коэффициента рассеяния μ_s , несмотря на то что такое понятие, как редуцированный коэффициент рассеяния, не входит в осевую модель. Объясняется это тем, что в условиях сильного рассеяния взаимодействие излучения со средой действительно определяется коэффициентом диффузии, т. е. редуцированным коэффициентом рассеяния. Следовательно, близость значений μ'_s и m_s просто отражает тот физический факт, что ВР соответствует реальному поведению фотонов в СРС. Сравнивая КДМ с УДМ, можно отметить, что значения μ'_s , полученные с помощью

Таблица 1

Характеристики СРС, определенные по временным распределениям, полученным с помощью моделирования методом Монте-Карло

ММК		КДМ		УДМ		НОМ	
$\mu_s, \text{мм}^{-1}$	$\mu'_s, \text{мм}^{-1}$	$\mu'_s, \text{мм}^{-1}$	δ	$\mu'_s, \text{мм}^{-1}$	δ	$m_s, \text{мм}^{-1}$	δ
1,4	0,448	0,782	0,746	0,603	0,346	0,586	0,308
1,5	0,480	0,710	0,479	0,588	0,225	0,553	0,152
1,6	0,512	0,745	0,455	0,613	0,197	0,684	0,336
1,7	0,544	0,805	0,480	0,668	0,228	0,648	0,191
1,8	0,576	0,836	0,451	0,602	0,045	0,574	0,003
1,9	0,608	0,895	0,472	0,665	0,094	0,698	0,148
2,0	0,640	0,953	0,489	0,761	0,189	0,760	0,188
2,1	0,672	1,003	0,493	0,802	0,193	0,802	0,193
2,2	0,704	1,075	0,527	0,820	0,165	0,836	0,188
2,3	0,736	1,132	0,538	0,953	0,295	0,985	0,338

УДМ, ближе к истинным значениям μ'_s , заданным для ММК, чем значения μ'_s , полученные с помощью КДМ. Таким образом, можно говорить о предпочтительности использования УДМ вместо КДМ для описания взаимодействия фотонов с биологическими сильнорассеивающими тканями.

Выводы

В целом можно сделать следующие выводы:

- НОМ дает значения m_s , близкие к редуцированному коэффициенту рассеяния μ'_s , а не к полно-

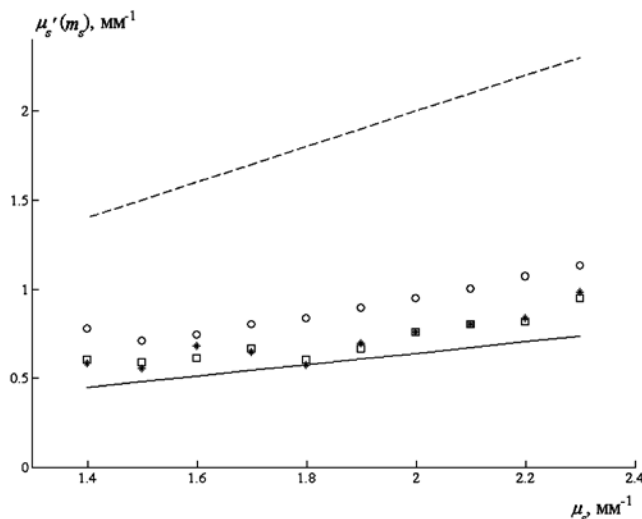


Рис. 2. Характеристики СРС μ'_s и m_s , определенные с помощью КДМ (○), УДМ (□) и НОМ (*). Параметры среды: толщина слоя – 10 мм; $\mu_a = 0,002 \text{ мм}^{-1}$; $g = 0,75$ (коэффициент рассеяния μ_s , изменяющийся в диапазоне от 1,4 до 2,3 мм^{-1} показан штриховой линией, редуцированный коэффициент рассеяния – сплошной линией)

му коэффициенту рассеяния μ_s , несмотря на то что в НОМ нет понятия редуцированного коэффициента рассеяния;

- УДМ дает более точные значения редуцированного коэффициента рассеяния, чем КДМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № П392 от 30.07.09 г.).

Список литературы:

1. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. – М.: Академия, 2006. 368 с.
2. Wilson B.C., Adam G. A Monte Carlo model for the absorption and flux distributions of light in tissue // Med. Phys. 1983. Vol. 10. PP. 824-830.
3. Wang L-H and Wu Hsin-I. Biomedical Optics: Principles and Imaging. – Wiley, 2007. 376 p.
4. Biomedical Photonics Handbook / Ed. T.Vo-Dinh. – Boca Raton: CRC Press, 2003. 1872 p.
5. Patterson M.S., Chance B., Wilson B.C. Time resolved reflectance and transmittance for the non-invasive measurement of tissue optical properties // Applied Optics. 1989. Vol. 28. № 12. PP. 2331-2336.
6. Терещенко С.А., Данилов А.А., Подгаецкий В.М. Уточненная диффузионная модель для описания взаимодействия лазерного излучения с биологической тканью // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 102. № 5. С. 840-845.
7. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 320 с.
8. Терещенко С.А., Данилов А.А., Долгушин С.А., Титенок С.А. Определение оптических характеристик биотканей по временному распределению ультракороткого лазерного импульса, прошедшего через однородный рассеивающий слой // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110. № 4. С. 678-684.

Сергей Андреевич Терещенко,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
Сергей Александрович Титенок,
аспирант,
кафедра биомедицинских систем,
Национальный исследовательский
университет «МИЭТ»,
г. Зеленоград,
e-mail: tsa@miee.ru