

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИОТКАНЕЙ ПО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

Лаппа А.В., Шипицин И.Е.*

Одной из физических задач лазерной медицины является определение дозы, поглощаемой биологической тканью в процессе ее облучения лазерным пучком. Распределение дозы можно вычислить, используя для этого имеющиеся модели переноса оптического излучения. В рамках теории переноса излучения распространение света рассматривается как случайный марковский процесс распространения фотонов, испытывающих 2 вида столкновений со средой – поглощение и рассеяние. Как правило, рассеяние описывают с помощью однопараметрической функции (индикатрисы рассеяния), в этом случае модель переноса является трехпараметрической: расчет дозы требует знания полного (макроскопического) сечения взаимодействия μ , сечения поглощения μ_a и фактора анизотропии g (обычно в качестве него используют средний косинус угла рассеяния). Значения этих параметров для данной ткани варьируются от организма к организму. Поэтому необходим экспрессный неинвазивный (или малоинвазивный) метод определения этих характеристик непосредственно в ходе операции.

Нами рассмотрена задача неинвазивного определения характеристик в геометрии, изображенной на рис.1: цилиндрический лазерный пучок, однородный по сечению, падает нормально на поверхность однородной полубесконечной ткани. Требуется определить оптические параметры среды по моментам радиального распределения плотности мощности излучения, выходящего из среды (в обратном направлении). В рамках принятой модели переноса эти моменты допускают следующее вероятностное представление (с точностью до нормировки):

$$I_k = \mathbf{M}I\rho^k, k = 0,1,2\dots, \quad (1)$$

где \mathbf{M} - символ осреднения (математического ожидания) по траекториям фотонов; I - индикатор выхода фотона из среды: $I=1$, если фотон вышел из среды, $I=0$, если фотон поглотился в среде; ρ - расстояние до оси пучка точки выхода фотона (рис. 1).

Исходя из вероятностной интерпретации (1), мы провели расчеты моментов методом Монте-Карло (для уменьшения статистической погрешности использовался метод коррелированной выборки, зеркальное отражение и преломление на границе сред не

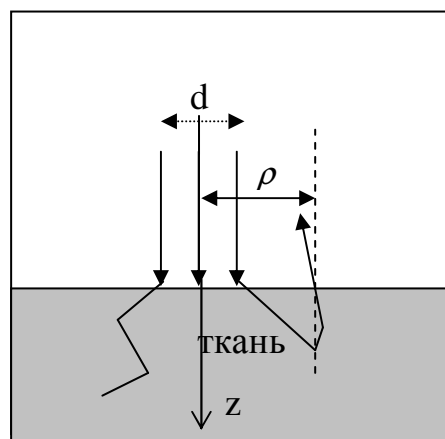


Рис. 1

* Челябинский государственный университет

учитывалось). Оказалось, что моменты, начиная с первого, сильно коррелируют друг с другом. В рамках погрешности эксперимента и метода Монте-Карло из всего набора моментов I_k информативными, с точки зрения определения оптических параметров, являются всего два: I_0 и какой-либо из $I_1, I_2, I_3 \dots$. Таким образом, в рамках предлагаемого метода имеется возможность определения не более двух из трех оптических параметров.

Мы разработали метод определения μ_a и g при известном значении полного макроскопического сечения взаимодействия μ , исходя из измерений моментов I_0 и I_2 . Момент I_2 был выбран потому, что в этом случае удастся отделить две составляющие момента: вклад, обусловленный случайностью точки входа фотона и вклад, обусловленный случайностью прохождения фотона через среду. Радиус-вектор точки выхода \mathbf{p} может быть представлен как сумма радиуса-вектора точки входа фотона \mathbf{r} и относительного смещения ξ , полученного фотоном в результате его движения в веществе (все эти векторы – двумерны, лежат в плоскости границы). Подставляя $\mathbf{p} = \mathbf{r} + \xi$ в формулу (1), учитывая равномерность распределения \mathbf{r} и ξ по полярному углу, получаем:

$$I_2 = I_2' + I_0 \frac{d^2}{8}, \quad (2)$$

где $I_2' = \mathbf{M}I\xi^2$ - значение второго момента для бесконечно тонкого луча (при $d = 0$).

Вследствие выбранной геометрии и однородности среды момент I_0 (совпадающий с вероятностью диффузного отражения) зависит только от двух

параметров: $p_a = \frac{\mu_a}{\mu}$ (вероятности поглощения фотона при столкновении) и фактора

анизотропии g . Момент I_2' зависит от трех переменных, но в силу тех же причин может быть приведен к двухпараметрическому виду:

$$I_2'(p_a, g, \mu) = \mu^2 I_2''(p_a, g),$$

где $I_2''(p_a, g) \equiv I_2'(p_a, g, 1)$ - момент от бесконечно тонкого пучка при $\mu = 1$.

Для определения искомых параметров p_a, g рассчитываются величины I_0, I_2'' как функции двух переменных. Результаты расчетов табулируются. Параметры находятся как решение системы уравнений:

$$\begin{cases} \hat{I}_0 = I_0(p_a, g) \\ (\hat{\mathbf{K}}_2 - \mathbf{K}_0 \frac{d^2}{8}) = \mu^2 I_2''(p_a, g) \end{cases}, \quad (3)$$

где слева – измеренные значения моментов, справа – рассчитанные и протабулированные функции. Метод может быть проиллюстрирован графически с помощью рис.2, где приведены рассчитанные линии уровня величин I_0 (сплошные линии) и $\sqrt{\frac{I_2''}{I_0}}$ (пунктирные линии) в координатах p_a, g . Точка пересечения двух линий уровня, соответствующих измеренным значениям \hat{I}_0 и \hat{I}_2 и будет решением системы (3).

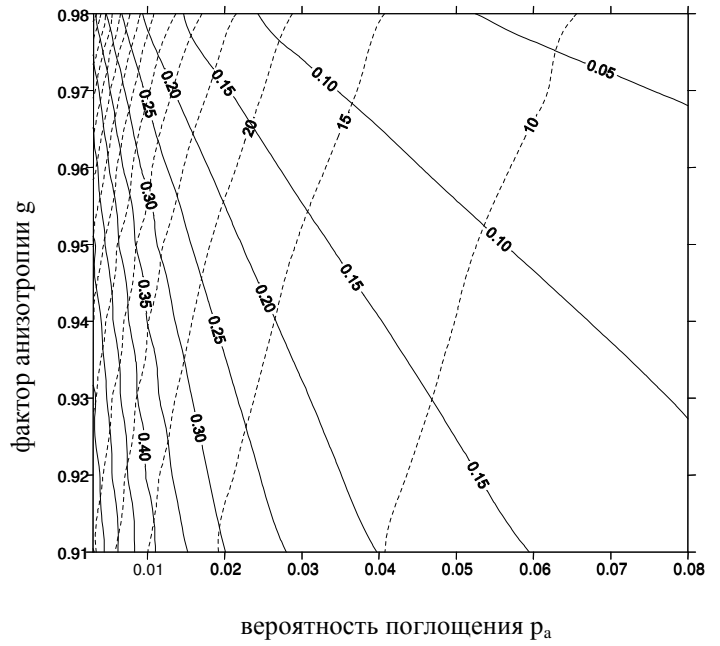


Рис. 2