

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ФГБОУ ВО «ЧЕЛГУ»)

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

«ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ КОЖИ»

Выполнил студент :

Бобырь Кира Евгеньевна

академическая группа ФФ-401, курс 4  
очной формы обучения

Научный руководитель

Зарезина Алла Степановна,

Доцент кафедры общей и

теоретической физики, кандидат

физ.-мат. наук.

# Цели и задачи:

Цель работы: исследование спектров отражения кожи с разным содержанием поглотителей электромагнитного излучения.

---

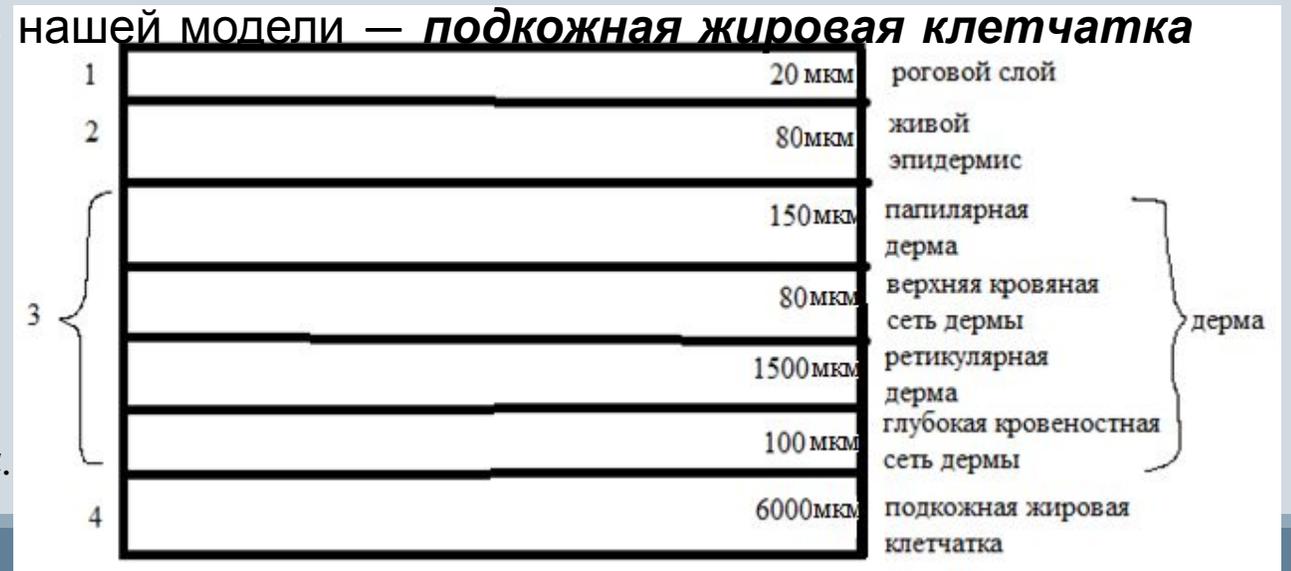
Задачи:

1. изучить программный комплекс для расчета спектров отражения кожи «Cloud Monte Carlo for light transport in turbid scattering medium» (<http://lighttransport.net/>)
2. промоделировать с помощью этого комплекса спектры отражения кожи с различным содержанием основных поглотителей (вода, кровь, меланин).

# ткани

Первый слой, **роговый слой**, толщиной 20 мкм, содержит шелушащиеся мертвые клетки. Второй слой, **эпидермис**, основным составляющим является кератин. Следующие четыре слоя описывают дерму. Такое деление связано с разным содержанием крови, основного поглотителя излучения, в этих слоях, а, следовательно, с разными коэффициентами поглощения, описывающими эти слои. Третий слой, **папиллярная дерма**, имеет толщину 150 мкм и в основном состоит из меланоцитов (клетки, вырабатывающие меланин). Четвертый слой, **верхняя кровеносная сеть дермы** имеет толщину 80 мкм состоит из меланина. Пятый слой, **ретикулярная дерма** имеет толщину 1500 мкм, состоит из коллагена и билирубина. Шестой слой, **глубокая кровеносная сеть дермы** имеет толщину 100 мкм, состоит из гемоглобина. Седьмой слой, самый глубокий слой в нашей модели — **подкожная жировая клетчатка** имеет толщину 6000 мкм, состоит из жира.

Рисунок 3.1 Модель кожи.



---

$$\mu_a(\lambda) = \sum_{i=1}^m [\mu_a^{(i)}(\lambda) C_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - C_j)] + \mu_a^{(0)}(\lambda) \prod_{i=1}^m (1 - C_i)$$

$$\mu_a^{\text{меланин}}(\lambda) = 5 * 10^9 \lambda^{-3.33}$$

$$\mu_a^{\text{другой}}(\lambda) = 7.84 * 10^7 \lambda^{-3.255}$$

$$\mu_a(\lambda) = \gamma C_{\text{кровь}} (1 - S) \mu_a^{\text{Hb}} + \gamma C_{\text{кровь}} S \mu_a^{\text{HbO}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} \mu_a^{\text{H}_2\text{O}} + (1 - \gamma C_{\text{кровь}}) (1 - C_{\text{H}_2\text{O}}) \mu_a^{\text{другой}}$$

$$\gamma = F_{\text{rbc}} F_{\text{Hb}} H$$

$$\mu_a^{\text{рог.сл}}(\lambda) = [0.1 - 0.3 * 10^{-4} \lambda + 0.125 \mu_a^{\text{другой}}(\lambda)] \times (1 - C_{\text{H}_2\text{O}}) + C_{\text{H}_2\text{O}} \mu_a^{\text{H}_2\text{O}}$$

# Математическая модель радиационных полей

$$\Omega \nabla I(\mathbf{r}, \Omega, \lambda) + \mu(\mathbf{r}, \lambda) I(\mathbf{r}, \Omega, \lambda) - \mu_s(\mathbf{r}, \lambda) \int p(\mathbf{r}, \Omega' \rightarrow \Omega, \lambda) I(\mathbf{r}, \Omega', \lambda) d\Omega' = S(\mathbf{r}, \Omega, \lambda) \quad (2.8)$$

$I(\mathbf{r}, \Omega)$  - дифференциальная интенсивность излучения.

Интенсивность излучения представляет собой количество световой энергии, перпендикулярно падающее на площадку единичной площади с нормалью  $\mathbf{n}$  с центром в точке  $\mathbf{r}$  (испускается с единицы площади видимой поверхности источника) из единичного телесного угла за единицу времени:

$$I = \frac{dE}{dS d\Omega dt}$$

$S(\mathbf{r}, \Omega)$  - функция источника, которая представляет собой дифференциальную плотность мощности излучения, равная количеству энергии, испускаемой единицей объема источника за единицу времени;

$\mu_t = \mu_s + \mu_a$  - коэффициент взаимодействия, показывает вероятность взаимодействия фотонов на единице длины пути.

$\mu_s$  - коэффициент рассеяния, т.е. вероятность рассеяния частицы на единице длины пути.

$\mu_a$  - коэффициент поглощения, т.е. вероятность поглощения частицы на единице длины пути.

$p(\Omega' \rightarrow \Omega)$  - индикатриса рассеяния, направление  $\Omega'$  при рассеянии в точке  $\mathbf{r}$  изменяется на направление  $\Omega$  внутри единичного телесного угла.

Уравнение (2.8) необходимо дополнить граничными условиями на границах «ткань-ткань» и «ткань-окружающая среда»:

$$\begin{cases} (\Omega n, \lambda)I(r, \Omega, \lambda) - (\Omega_R n, \lambda)RI(r, \Omega_R, \lambda) - (\Omega_T n, \lambda)TI(r, \Omega_T, \lambda) = S(r, \Omega, \lambda) \\ ([\Omega_T, \Omega_R], \Omega, \lambda) = 0 \end{cases}$$


---

Френелевские коэффициенты отражения -  $R$ , определяются:

$$R(\alpha_1) = \begin{cases} \left(\frac{n-n_0}{n+n_0}\right)^2, & \text{если } \alpha_i = 0^\circ \\ \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\alpha_i - \alpha_t)}{\sin^2(\alpha_i + \alpha_t)} + \frac{\text{tg}^2(\alpha_i - \alpha_t)}{\text{tg}^2(\alpha_i + \alpha_t)} \right], & \text{если } 0^\circ < \alpha_i < \sin^{-1}\left(\frac{n_0}{n}\right) \\ 1, & \text{если } \sin^{-1}\left(\frac{n_0}{n}\right) < \alpha_i \leq 90^\circ \end{cases}$$

# Численный метод Монте-Карло

Сначала проведём расчёт траекторий пакетов фотонов, достигших области детектирования, для непоглощающей среды ( $\mu_a=0$ )

---

Затем учтём поглощение слоёв среды. Для этого, следуя траектории движения каждого отдельно взятого пакета, пересчитываем его статистический весовой коэффициент на протяжении всего пути случайных блужданий в соответствии с коэффициентом поглощения слоев среды  $\mu_a$ , т.е. каждый раз уменьшаем вес пакета фотона пропорционально  $\exp(-\mu_a l)$ .

$$W = W_0 \exp\left(-\sum_{k=1}^N \mu_a l_k\right)$$

Длина свободного пробега  $l$  принимает положительные значения с плотностью вероятностей:

$$p(l) = \mu_t \exp(-\mu_t l) = \mu_s \exp(-\mu_s l) \exp(-\mu_a l) + \mu_a \exp(-\mu_a l) \exp(-\mu_s l)$$

$\mu_t = \mu_s + \mu_a$  – коэффициент экстинкции;

Справа первое слагаемое вероятность рассеяния фотона на рассеивающем центре, а множитель  $\exp(-\mu_a l)$  уменьшение этой вероятности с возможным поглощением фотона. Второе слагаемое определяет вероятность поглощения фотона в данной среде и возможные изменения этой вероятности вследствие рассеяния.

При преломлении или отражении пакета фотонов на границе раздела слоёв происходит уменьшение его статистического веса пропорционально коэффициенту френелевского отражения.

Общий вес фотонов, который достиг области выхода определяется:

$$W = [W_0 \prod_{j=1}^M R_j(\alpha)] \exp(-\sum_{k=1}^N \mu_a l_k)$$

Ослабление интенсивности излучения вследствие отражения на границе среды учитывается посредством продолжения моделирования траекторий пакетов фотонов, потерпевших отражение на границе среды один или более раз. Траектория пакета фотонов прослеживается до тех пор, пока статистический вес пакета, уменьшающийся вследствие преломления и отражения на границах слоёв среды, не становится меньше заданного значения 0.001.

Полная интенсивность излучения  $I$ , регистрируемая детектором, определяется как сумма статистических весов пакетов фотонов, достигающих области детектора:

$$I = \sum_{q=1}^{N_{ph}} W_q$$

Коэффициент диффузного отражения  $R_d$  определяется как отношение интенсивностей падающего и вышедшего излучений:

$$R_d(\lambda, \mathbf{r}) = I/I_0 = \frac{1}{N_{ph}} \sum_{q=1}^{N_{ph}} \left( \prod_{j=1}^{M_q} R_j(\alpha) \right) \exp(-\sum_{k=1}^{N_q} \mu_a l_k(\lambda, \mathbf{r}))$$

# Результаты моделирования

1. Используя значения параметров слоев кожи по умолчанию, меняем значение концентрации меланина [%]: 2, 20, 45.

По оси ординат: спектр отражения, безразмерная физическая величина, по оси абсцисс длина волны [Нм]

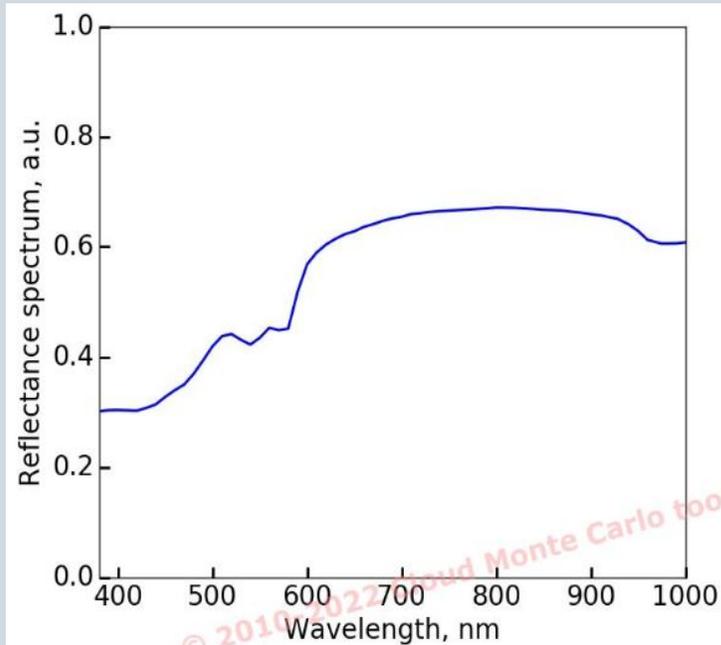


Рисунок 3.3.1 Концентрация меланина: 2%

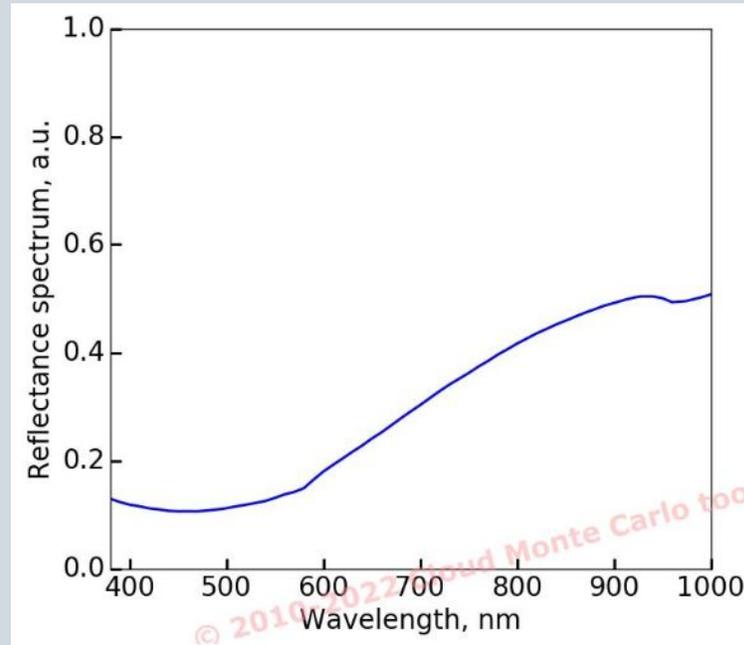


Рисунок 3.3.2 Концентрация меланина: 20%

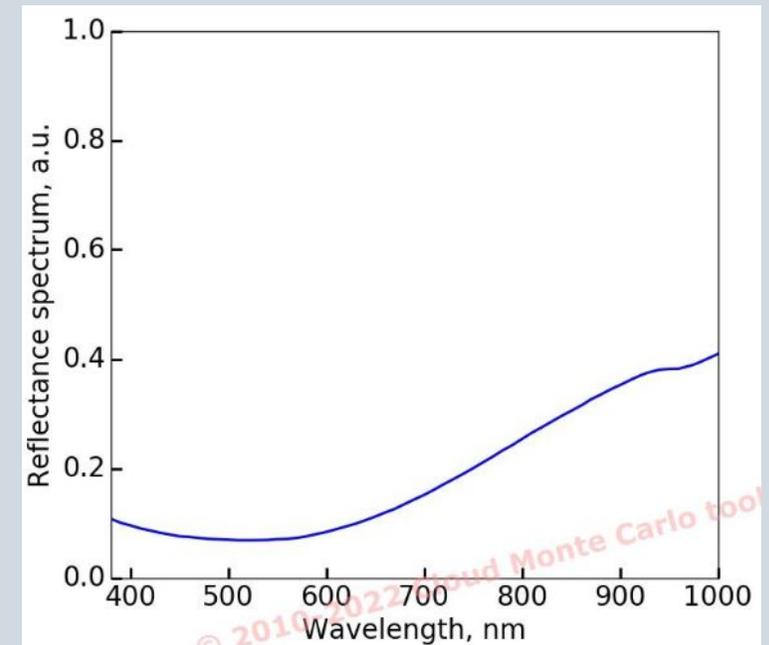


Рисунок 3.3.3 Концентрация меланина: 45%

Анализ: из графиков (3.3.1 - 3.3.3) можно заметить: диффузно отражённое излучение убывает с увеличением концентрации меланина: 2 %, 20 %, 45 %. Поглощение в видимой области увеличивается и снижается в области УФ-спектра.

# Результаты моделирования

2. Следующая задача предстоит в изменении объёмного содержания крови и насыщении крови кислородом в роговом слое и эпидермисе.

Объёмное содержание крови в роговом слое изменилось с 0% до 2%, а в эпидермисе изменилось с 0% до 5%.

Насыщению крови кислородом в роговом слое и эпидермисе изменилось с 0% до 70%.

Слой #	Имя слоя	С крови [%]	Нт [%]	С кровь [%]	С вода [%]	г
1	<u>Роговой слой</u>	<u>2</u>	<u>0</u>	<u>70</u>	<u>5</u>	<u>20,0</u>
2	<u>Живой эпидермис</u>	<u>5</u>	<u>0</u>	<u>70</u>	<u>20</u>	<u>80,0</u>
3	<u>Сосочковая дерма</u>	<u>4</u>	<u>45</u>	<u>70</u>	<u>50</u>	<u>100,0</u>
4	<u>Верхняя кровяная сетка дермы</u>	<u>30</u>	<u>45</u>	<u>70</u>	<u>60</u>	<u>80,0</u>
5	<u>Ретикулярная дерма</u>	<u>4</u>	<u>45</u>	<u>70</u>	<u>70</u>	<u>1620,0</u>
6	<u>Глубокая сетчатая дерма крови</u>	<u>10</u>	<u>45</u>	<u>70</u>	<u>70</u>	<u>200,0</u>
7	<u>Подкожный жир</u>	<u>5</u>	<u>45</u>	<u>70</u>	<u>30</u>	<u>5900,0</u>

*Рисунок 3.3.4 Модельное описание слоёв кожи с новыми характеристиками*

# Результаты моделирования

Сравнительные графики: первый со стандартным набором параметров слоёв, второй с изменением в двух слоях кожи объёмного содержания крови и насыщения крови кислородом. Концентрация меланина 2% в обоих случаях.

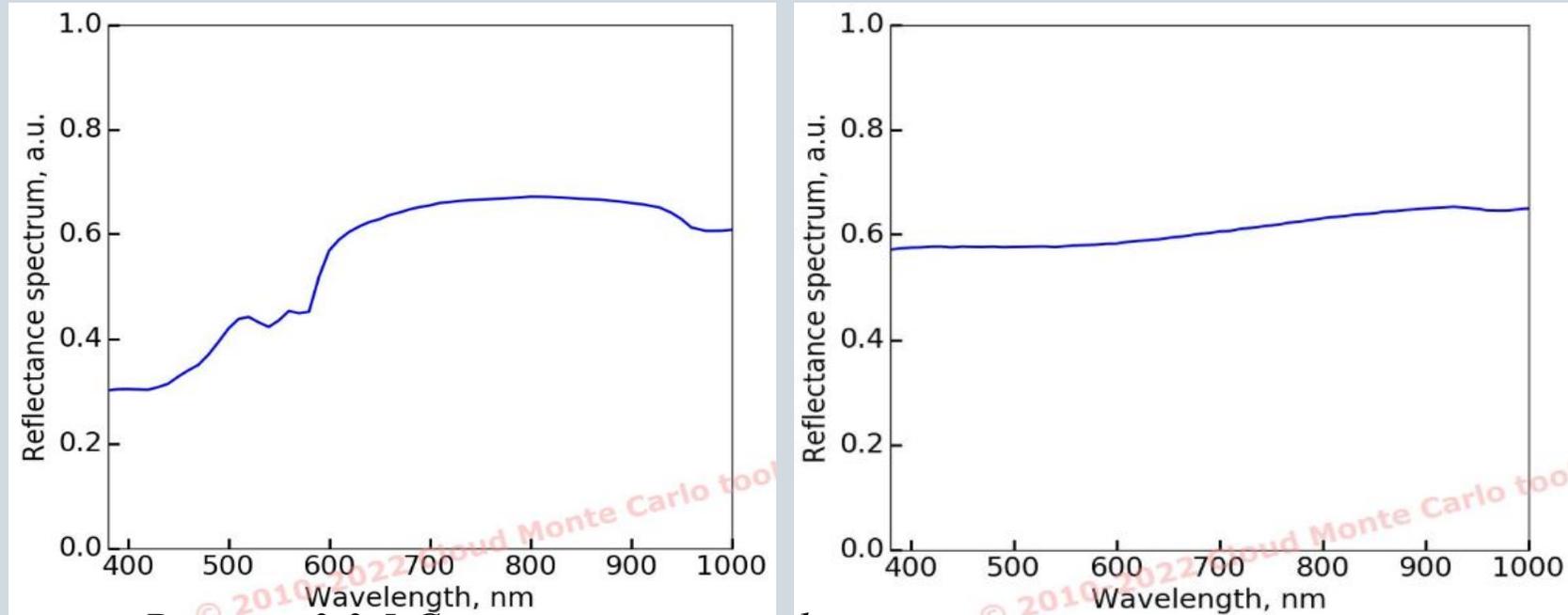


Рисунок 3.3.5 Сравнительные графики спектров отражения

Анализ: изменяя параметры крови в верхних слоях кожи, происходят сильные изменения поглощения, этим можно объяснить важность пространственного распределения крови в спектрах диффузного отражения.