

Оценка содержания меланина в волосах человека с помощью инверсного метода Монте-Карло и системы цифрового анализа изображений

А.Н.Башкатов, Э.А.Генина, В.И.Кочубей, В.В.Тучин

На основе цифрового анализа изображений и инверсного метода Монте-Карло разработан метод экспресс-анализа и выполнена оценка оптических свойств волос различных типов в трех спектральных диапазонах, соответствующих трем цветовым компонентам. Использование инверсного метода Монте-Карло впервые дало возможность разделить рассеивающие и поглощающие свойства волоса. Анализ коэффициента поглощения позволил оценить содержание в волосах различных типов меланина. Показано, что в волосах темного цвета доминирующим типом меланина является эумеланин, в то время как в светлых волосах преобладает феомеланин.

Ключевые слова: поглощение, рассеяние, цветовой анализ, инверсный метод Монте-Карло, меланин.

1. Введение

Знание оптических параметров биологических тканей является ключевым моментом при разработке теоретических моделей, описывающих распространение света в биотканях (к каковым относятся и волосы человека). Эти модели могут быть использованы при решении большого числа важнейших задач лазерной терапии, диагностики различных заболеваний, интерпретации спектрофотометрических измерений и т. д. Однако, несмотря на рост числа публикаций, связанных как с методами определения оптических параметров биотканей, так и с непосредственными измерениями этих параметров, оптические параметры многих биотканей, их структурно-морфологические свойства и компонентный состав продолжают оставаться недостаточно изученными [1–3].

Аналізу содержания меланина в различных биологических тканях отводится одно из центральных мест в современной биомедицинской оптике. Подобный интерес связан, в первую очередь, с потребностями дерматологии и косметологии в знании концентрации и физико-химических характеристик данного пигмента, что обусловлено необходимостью разработки новых, все более эффективных методов диагностики и лечения различных заболеваний кожи и волос, методик лазерной эпиляции волос и т. д. [4–6]. Достаточно большое число работ посвящено исследованию содержания меланина в волосах человека [7–19]. В основном для оценки содержания меланина используются методы жидкостной хроматографии [8, 10, 12, 16, 19] и микроспектрофотометрического анализа в широком диапазоне длин волн [7, 9, 18, 19]. Низкокогерентная рефлектометрия также является достаточно перспективным методом, позволяющим прово-

дить измерения вдоль и поперек волоса с высоким пространственным разрешением [11]. Однако эти измерительные системы и методы достаточно дорогостоящи, трудоемки и, кроме того, требуют значительного (порядка нескольких десятков часов) времени для проведения анализа. В связи с этим разработка новых эффективных и экономичных методов экспресс-анализа содержания меланина весьма актуальна.

Перспективным для оценки содержания меланина является метод цифрового анализа изображений. Системы цифрового анализа изображения в настоящее время достаточно широко применяются в дерматологии, в основном для изучения малых областей кожи при кожных заболеваниях, анализа цветового фона и получения цветовой информации в каждой точке, формирующей изображение [6, 20–31]. Ранее нами были проведены основанные на цифровом анализе изображений волоса предварительные исследования [13–15], направленные на разработку системы экспресс-анализа оптических характеристик волос и оценку содержания в них меланина. Однако данные исследования имеют предварительный характер и требуют дальнейшего развития и учета структурно-морфологических и оптических (особенно рассеивающих) характеристик волоса.

Целью настоящей работы является разработка метода экспресс-анализа оптических характеристик волос и оценка содержания меланина в волосах различных типов.

2. Структура и строение волоса

Геометрически волос человека представляет собой усеченный конус диаметром от 10 до 250 мкм. Внешняя оболочка волоса (кутикула) образована тонким (примерно 10 % от веса волоса), но достаточно жестким каркасом, состоящим в основном из кератина и протеолипидов, формирующих гидрофобную мембрану волоса [32, 33]. Внутренняя часть волоса (кортекс) образована кератинизированными волокнами, окруженными серо-содержащим матриксом и тремя специализированными

А.Н.Башкатов, Э.А.Генина, В.И.Кочубей, В.В.Тучин. Научно-образовательный институт оптики и биофотоники Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского, Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83; e-mail: bash@optics.sgu.ru

Поступила в редакцию 6 июля 2006 г., после доработки – 21 сентября 2006 г.

Табл.1. Литературные данные по концентрациям меланина в волосах различных типов.

Цвет волос	Концентрация меланина (мг/г)				
	[12]	[10]	[17]	[18]	[16]
Черный	13.485	–	5.37	31 ± 15 ¹⁾	7.2
Белый (блондин)	3.46 ± 0.73 ²⁾	–	1.165	–	2.5
Белый (альбинос)	0.65	–	1.626	–	–
Рыжий (различные оттенки)	39.85 ± 52.48 ³⁾	4.065	1.9 ± 0.7 ²⁾	–	2.5
Темно-каштановый	10.175	3.3 ± 1.5 ⁴⁾	3.2	–	5.2
Каштановый	5.55	2.64 ± 0.92 ⁵⁾	3.086	–	–
Светло-каштановый	–	2.065	1.605	–	–
Светло-русый	–	2.23	1.281	–	–

¹⁾ Усреднение по 3 значениям; ²⁾ усреднение по 2 значениям; ³⁾ усреднение по 10 значениям; ⁴⁾ усреднение по 6 значениям; ⁵⁾ усреднение по 4 значениям.

типами клеток, отвечающих за метаболизм и морфологию волоса [32]. В кортексе волоса располагаются и меланиновые гранулы. На кортекс приходится примерно 90 % веса волоса [33]. Цвет волос у человека определяется их структурой, а также концентрацией и типом содержащегося в них меланина: эумеланином, который является главным образом черным и окрашивает волосы в черный и каштановый цвета, и желтым или рыжим феомеланином, придающим волосам более светлые оттенки [7–9, 16–19, 33].

В работе [16] было показано, что эумеланин является доминирующим типом меланина для волос всех типов. Так, черные волосы содержат 99 % эумеланина и 1 % феомеланина, каштановые волосы и волосы блондинов – 95 % эумеланина и 5 % феомеланина и только рыжие волосы содержат 67 % эумеланина и 33 % феомеланина. Однако из данных работы [19] следует, что эумеланин и феомеланин присутствуют в волосах разных типов примерно в одинаковой пропорции. В свою очередь, авторы работ [8–10, 12, 17] установили, что в светлых волосах доминирует феомеланин, а в темных – эумеланин.

Данные по концентрации меланина в волосах различных типов также весьма противоречивы (табл.1). Из табл.1 видно, что концентрация меланина в волосах черного цвета варьируется, по данным разных авторов, от 31 до 5.37 мг/г (концентрация выражена в миллиграммах меланина на 1 г волоса), т. е. изменяется примерно в шесть раз. Еще большее различие наблюдается для рыжих волос разных оттенков. Даже для волос альбиносов имеет место трехкратный разброс в значениях концентрации меланина. По-видимому, столь большой разброс связан со сложностью систематизации цвета волос, во многом носящей субъективный характер, и использованием разных методик выделения меланина. Так, например, в работе [18] было показано, что при выделении меланина из волос одного и того же типа применение разных методик выделения приводит к тому, что массовая концентрация меланина составляет 2.2 %, 4.8 % и 2.3 %.

Рассеивающие свойства волоса определяются неоднородностью его строения. Белый цвет волос, наблюдаемый при отсутствии меланина, обусловлен оптическим эффектом, возникающим в результате преломления и отражения лучей внутри волоса, падающих на различные границы раздела с разными показателями преломления.

Таким образом, непигментированные волосы с большим количеством мозгового вещества (кортекса), как правило, более светлые, чем волосы без мозгового вещества. Этот же эффект наблюдается для изношенных и

ломких волос – кортекс и кутикула становятся прерывистыми и образуют многочисленные границы раздела с внутренним отражением и преломлением света [34]. Вновь образованные непигментированные волосы, лишённые мозгового вещества, являются скорее желтоватыми, чем белыми. Возможно, что это обусловлено цветом, свойственным плотному кератину [34].

Поседение волос обычно является признаком старения и связано с прогрессирующим снижением функции меланоцитов. Седой цвет волос связывается с наличием у людей старшего возраста воздушных пространств внутри волоса. В седеющих волосах наблюдается постепенное разрушение пигмента, т. е. на длине отдельного волоса и от волоса к волосу можно видеть полный спектр цветов, начиная от естественного (для данного человека) до белого. В седых волосах меланоциты встречаются нечасто или вовсе отсутствуют, а также могут находиться в неактивном состоянии [34].

Таким образом, поглощение волоса определяется поглощением содержащегося в нем меланина, а основными рассеивателями в волосе являются кератиновые чешуйки кутикула волоса и меланиновые гранулы, расположенные в его кортексе. У пожилых людей рассеяние света происходит также на пузырьках воздуха внутри волоса, образующихся вследствие разрушения меланиновых гранул.

3. Материалы и методы исследований

Образцы волос для исследований были взяты у 10 добровольцев. Первая серия образцов волос была получена от девушки-шатенки 19 лет, вторая – от девушки-брюнетки 20 лет, третья – от русого мужчины с сединой 45 лет, четвертая – от девушки-блондинки 19 лет, пятая – от седой (в молодости светло-русой) женщины 60 лет, шестая – от седой (в молодости шатенки) женщины 70 лет, седьмая и восьмая – от темно-русых девушек 20 лет, девятая – от седого (в молодости русого) мужчины 70 лет и десятая – от темно-русого мужчины 35 лет. Во всех сериях содержалось по 30 образцов волос.

In vitro оптические характеристики волоса (коэффициенты отражения и пропускания) были измерены на экспериментальной установке (рис.1) с использованием цифрового анализа изображений волоса. Применяемая схема эксперимента позволяет измерить коэффициенты отражения и пропускания волоса в определенных спектральных интервалах, отвечающих основным цветам в RGB-системе цветовых координат – красному, зеленому и синему. В работе [13] была выполнена оценка длин волн

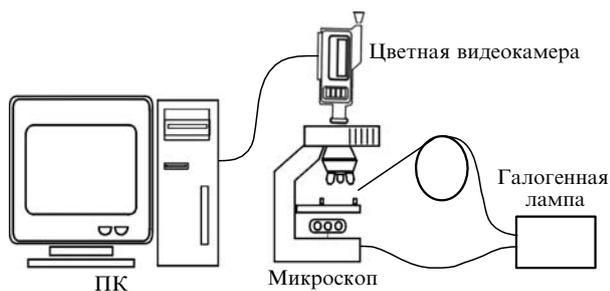


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

максимумов и полуширин спектральных полос, соответствующих трем используемым цветовым компонентам: красной ($\lambda_R = 600$ нм, $\Delta\lambda_R = 51.4$ нм), зеленой ($\lambda_G = 540$ нм, $\Delta\lambda_G = 74.1$ нм) и синей ($\lambda_B = 460$ нм, $\Delta\lambda_B = 47$ нм).

Система цветового анализа включает в себя совмещенную с микроскопом цветную видеокамеру (SVHS Sony, CCD-TR617E PAL, Япония), позволяющую получать цветное изображение исследуемого объекта и передавать данные на персональный компьютер для последующей обработки, и исследуемый объект, закрепленный на специальной пластине. В зависимости от условий регистрации изображения волоса (в проходящем или отраженном свете) эта пластина представляла собой либо прозрачное предметное стекло, либо черно-белый тест-объект с закрепленным на нем волосом, который использовался для обеспечения одинаковых условий регистрации при автоподстройке видеокамеры, в частности минимизации гамма-коррекции изображения. Тест-объектом служили наклеенные на пластину образцы плотной черной и белой бумаги. Освещение объекта проводилось через оптическое волокно, соединенное с источником света – галогеновой лампой.

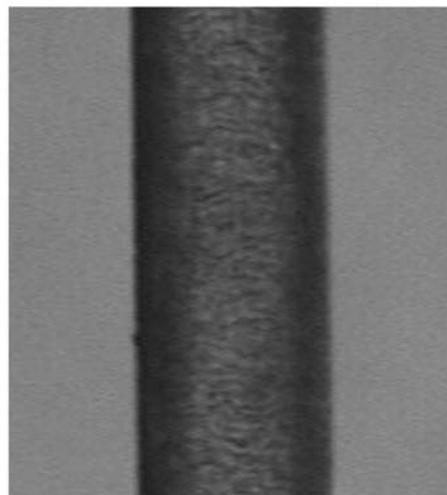
Если изображение объекта (человеческого волоса) регистрировалось в проходящем свете, свет подводился оптическим волокном под предметный столик микроскопа перпендикулярно объекту исследования. Объект освещался через матовое стекло для обеспечения равномерной засветки поля зрения видеокамеры. После прохождения излучения галогеновой лампы через матовое стекло собирающая линза фокусировала прошедшее излучение на исследуемый объект. В случае когда изображение объекта регистрировалось в отраженном свете, свет галогеновой лампы подводился к объекту сверху, под углом $\sim 45^\circ$ между плоскостью, в которой расположен исследуемый объект (предметный столик микроскопа), и нормалью к его поверхности. Подобная геометрия эксперимента позволяет избежать бликов, обеспечить равномерную засветку всего исследуемого объекта и избежать попадания в объектив видеокамеры зеркальной компоненты френелевского отражения. Размеры освещаемой области (10×10 мм) превышали поле зрения системы (1×1 мм), что обеспечивало равномерную освещенность исследуемого объекта. На микроскопе был установлен двадцатикратный объектив с числовой апертурой 0.4. Перед проведением измерений диаметр каждого волоса измерялся микрометром. Помимо этого, в процессе обработки полученных изображений толщина волоса оценивалась согласно методике, представленной в работах [14, 15], для чего в проходящем свете регистрировалось изображение цилиндрического объекта известного диаметра и вычислялся его диаметр в пикселях, что

позволяло определять диаметр волоса с точностью до долей микрометра.

Полученное изображение волоса передавалось на персональный компьютер в виде стандартного файла в формате BMP для последующей обработки. Изображение представлялось в виде набора данных с пространственным разрешением 720 (по горизонтали) \times 540 (по вертикали) точек и цветовым разрешением 256 градаций яркости для каждой цветовой компоненты. Типичные изображения русого волоса, снятые в отраженном и проходящем свете, представлены на рис.2 и 3.

Изображение волоса, закрепленного на специальной пластине, раскладывалось на три цветовые компоненты с помощью компьютерной системы Mathcad 2001 Professional (MathSoft, Inc., США), имеющей встроенный набор стандартных функций для обработки изображений. Для каждой цветовой компоненты изображение волоса сканировалось в поперечном сечении щелью шириной 21 пиксель. Выбор участка сканирования осуществлялся визуально, с учетом отсутствия на изображении бликов, засветок, изображений частичек пыли и т.д. В пределах полосы сканирования яркости отдельных пикселей усреднялись. На рис.4 и 5 представлены типичные кривые, иллюстрирующие данную операцию.

Коэффициент отражения волоса R определялся как отношение яркости изображения волоса I_h к яркости изображения белого тест-объекта I_r , на котором волос был

Рис.2. Типичная фотография русого волоса, снятая в отраженном свете. Увеличение $200\times$.Рис.3. Типичная фотография русого волоса, снятая в проходящем свете. Увеличение $200\times$.

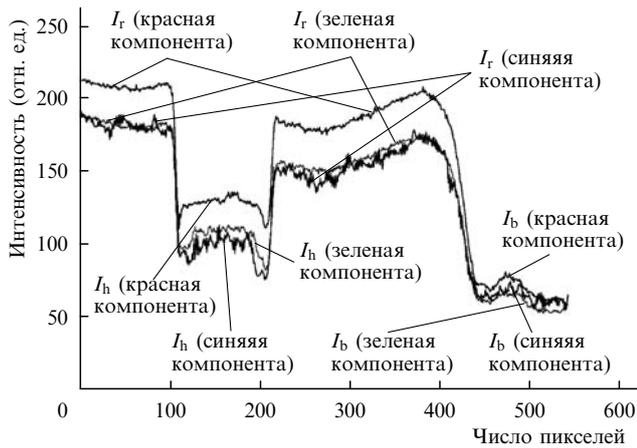


Рис.4. Распределения интенсивностей в поперечном сечении полученного в отраженном свете изображения русого волоса, закрепленного на специальной пластине, для трех цветовых компонент (I_r – яркость изображения белого тест-объекта).

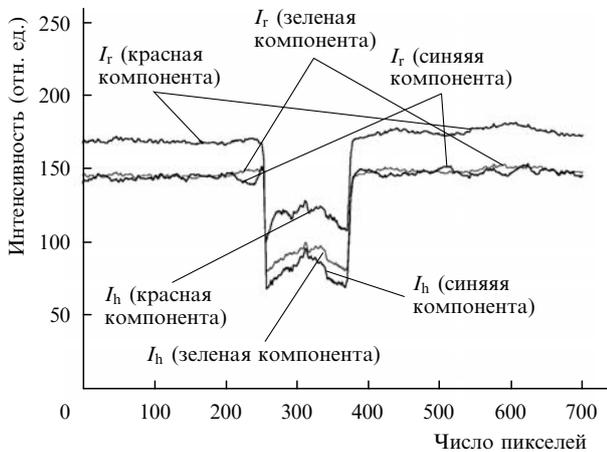


Рис.5. Распределения интенсивностей в поперечном сечении полученного в проходящем свете изображения русого волоса, закрепленного на специальной пластине, для трех цветовых компонент (I_r – яркость изображения прозрачного предметного стекла).

закреплен. Кроме того, для учета фоновой засветки изображения внешними источниками освещения как из яркости волоса, так и из яркости белого тест-объекта вычиталась яркость черного тест-объекта I_b . В результате выражение для коэффициента отражения R имеет вид

$$R = \frac{I_h - I_b}{I_r - I_b}. \quad (1)$$

Коэффициент пропускания волоса T определялся как отношение яркости изображения волоса I_h к яркости изображения прозрачного предметного стекла I_r :

$$T = \frac{I_h}{I_r}. \quad (2)$$

Поскольку, как видно из рис.4 и 5, распределение яркости в полосе сканирования волоса по направлению от его центра к периферии довольно существенно изменяется, что связано с геометрией волоса, т. е. с изменением толщины объекта в зависимости от радиальной координаты, то значения I_h , I_r и I_b , полученные в результате сканирования соответствующих областей изображения, усреднялись.

Для определения коэффициентов поглощения и рассеяния волоса по измеренным значениям коэффициентов отражения и пропускания использовался широко применяемый в оптике биотканей инверсный метод Монте-Карло, поскольку он позволяет учесть структуру биоткани, параметры экспериментальной установки, геометрию измерений, размер и форму пучка падающего и детектируемого излучения, переотражение на границах раздела слоев среды и другие параметры [2, 35–37]. Прямая задача решалась на основе алгоритма статистического моделирования, подробно описанного в работе [37].

Метод Монте-Карло основан на расчете большого числа случайных траекторий фотонов в рассеивающей среде, от оптических свойств которой зависят длина и форма индивидуальных траекторий, и на последующей статистической обработке полученных результатов. Основными входными параметрами при моделировании являются коэффициенты поглощения (μ_a) и рассеяния (μ_s) среды, фактор анизотропии рассеяния g и показатель преломления n . В настоящей работе при проведении всех расчетов фактор анизотропии принимался равным 0.8. Показатель преломления волоса фиксировался и составлял 1.5 [38]. При моделировании методом Монте-Карло использовались 10^6 фотонных пакетов по 10^4 фотонов в каждом пакете. При расчете траекторий распространения света в среде применялась фазовая функция рассеяния Хензи – Гринштейна

$$f_{\text{HG}} = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}},$$

где θ – полярный угол рассеяния. Распределение по азимутальному углу рассеяния считалось равномерным. Геометрически волос моделировался в виде бесконечно длинного однородного цилиндра заданного диаметра. При этом, исходя из структуры волоса, при проведении данного моделирования предполагалось, что как поглощающие, так и рассеивающие центры равномерно распределены по всему объему волоса фолликула. При моделировании учитывалась реальная геометрия освещения и детектирования, т. е. числовая апертура объектива микроскопа.

Обратная задача (определение коэффициентов μ_a и μ'_s волоса) решалась на основе минимизации целевой функции

$$F(\mu_a, \mu'_s) = [R(\mu_a, \mu'_s) - R^{\text{exp}}]^2 + [T(\mu_a, \mu'_s) - T^{\text{exp}}]^2, \quad (3)$$

где $R(\mu_a, \mu'_s)$ и $T(\mu_a, \mu'_s)$ – рассчитанные, а R^{exp} и T^{exp} – экспериментально измеренные для каждой цветовой компоненты коэффициенты отражения и пропускания волоса. В качестве итерационной процедуры использовался симплексный метод Нелдера – Мида, подробно описанный в работе [39]. Начальные значения μ_a и μ'_s рассчитывались из выражений [40]

$$\frac{\mu'_s}{\mu_a - \mu'_s} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{1 - 4R - T}{1 - T} \right)^2 & \text{при } \frac{R}{1 - T} < 0.1, \\ 1 - \frac{4}{9} \left(\frac{1 - 4R - T}{1 - T} \right)^2 & \text{при } \frac{R}{1 - T} \geq 0.1, \end{cases}$$

$$(\mu_a + \mu_s')d = \begin{cases} -\frac{\ln T \ln 0.05}{\ln R} & \text{при } R \leq 0.1, \\ 2^{1+5(R+T)} & \text{при } R > 0.1, \end{cases}$$

где $\mu_s' = \mu_s(1 - g)$ – транспортный коэффициент рассеяния; d – диаметр волоса. В качестве критерия завершения итерационной процедуры использовалось условие

$$\left| \frac{R^{\text{exp}} - R^{\text{calc}}}{R^{\text{exp}}} \right| + \left| \frac{T^{\text{exp}} - T^{\text{calc}}}{T^{\text{exp}}} \right| < 0.01,$$

где R^{exp} , R^{calc} и T^{exp} , T^{calc} – соответственно экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные коэффициенты отражения и пропускания и пропуска волоса.

В первом приближении коэффициенты поглощения волоса, определенные для спектральных областей, соответствующих цветовым RGB-компонентам, могут быть определены как

$$\begin{aligned} \mu_a^{460} &= C_m [\varphi_{\text{eu}} \varepsilon_{\text{eu}}^{460} + (1 - \varphi_{\text{eu}}) \varepsilon_{\text{pheo}}^{460}], \\ \mu_a^{540} &= C_m [\varphi_{\text{eu}} \varepsilon_{\text{eu}}^{540} + (1 - \varphi_{\text{eu}}) \varepsilon_{\text{pheo}}^{540}], \\ \mu_a^{600} &= C_m [\varphi_{\text{eu}} \varepsilon_{\text{eu}}^{600} + (1 - \varphi_{\text{eu}}) \varepsilon_{\text{pheo}}^{600}]. \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь φ_{eu} – доля эумеланина в волосе (доля феомеланина определяется как $1 - \varphi_{\text{eu}}$); C_m – суммарная (эумеланин + феомеланин) концентрация меланина (в мг/мл); $\varepsilon_{\text{eu}}^{460} = 10.11$, $\varepsilon_{\text{eu}}^{540} = 6.25$ и $\varepsilon_{\text{eu}}^{600} = 4.3$ – коэффициенты экстинкции эумеланина (в $\text{мл}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{мг}^{-1}$) и $\varepsilon_{\text{pheo}}^{460} = 7.42$, $\varepsilon_{\text{pheo}}^{540} = 3.35$ и $\varepsilon_{\text{pheo}}^{600} = 174$ – коэффициенты экстинкции феомеланина (в $\text{мл}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{мг}^{-1}$) на длинах волн $\lambda = 460, 540$ и 600 нм [41]. При проведении расчетов собственным поглощением других компонентов волоса (например кератина) пренебрегалось.

Концентрация меланина определялась минимизацией целевой функции

$$\begin{aligned} F(C_m, \varphi_{\text{eu}}) &= (\mu_a^{460} - \mu_a^{\text{B}})^2 + (\mu_a^{540} - \mu_a^{\text{G}})^2 \\ &+ (\mu_a^{600} - \mu_a^{\text{R}})^2 \end{aligned} \tag{5}$$

относительно неизвестных величин C_m и φ_{eu} . Здесь μ_a^{460} , μ_a^{540} , μ_a^{600} – коэффициенты поглощения волоса, рассчитанные для $\lambda = 460, 540$ и 600 нм с помощью системы уравнений (4), а μ_a^{R} , μ_a^{G} , μ_a^{B} – коэффициенты поглощения, экспериментально измеренные в спектральных областях, соответствующих RGB-компонентам изображения волоса. Минимизация выполнялась симплексным методом

Нелдера – Мида [39]. Итерационная процедура проводилась до согласования теоретических и экспериментальных значений коэффициентов поглощения с погрешностью не менее 5 %.

В качестве дополнительного контроля содержания меланина было выполнено кислотно-щелочное экстрагирование меланина из волос черного цвета согласно методике, представленной в работе [18]. Образцы волос черного цвета по 20 г каждый полностью растворялись в сильно концентрированном щелочном растворе NaOH в течение трех суток при температуре 4 °С. Далее раствор нейтрализовался соляной кислотой в течение одного дня и полученный осадок центрифугировался (5000 об./мин) в течение 10 мин. Осадок трижды промывался дистиллированной водой при центрифугировании (5000 об./мин) в течение 10 мин и высушивался. В зависимости от образца волос выход меланина составлял 116–232 мг, что соответствует диапазону концентраций 5.8–11.6 мг/г. Среднее значение концентрации равно 8.7 ± 4.1 мг/г.

4. Результаты и обсуждение

В табл.2 приведены диаметры, а также коэффициенты пропускания и отражения волос различных типов, измеренные согласно методике, представленной в разд.3. Результаты измерений разбиты по сериям (см. разд.3) и спектральным областям, соответствующим цветовым RGB-компонентам. Все данные усреднены по 30 образцам волос, полученных от каждого добровольца, и для каждого среднего значения указано среднее квадратичное отклонение. Из табл.2 видно, что волосы молодых людей имеют большую толщину по сравнению с толщиной волос у людей пожилого возраста. При этом необходимо отметить, что в пределах одной возрастной группы темные волосы толще светлых.

Анализ коэффициентов отражения и пропускания волос различных типов показывает, что при переходе из синей в красную область спектра для всех типов волос наблюдается уменьшение коэффициента отражения и рост коэффициента пропускания, что свидетельствует об уменьшении коэффициента рассеяния при переходе из коротковолновой в длинноволновую область спектра.

В табл.3 представлены значения μ_a и μ_s' , вычисленные на основе экспериментально измеренных коэффициентов отражения и пропускания с использованием инверсного метода Монте-Карло в спектральных областях, соответствующих трем цветовым компонентам. Из нее видно, что максимальное поглощение наблюдается для волос темного цвета, т. е. каштановых, черных и темно-русых.

Табл.2. Экспериментальные данные, полученные с помощью цифровой обработки изображений волос.

Номер серии	d (мкм)	Красная компонента		Зеленая компонента		Синяя компонента	
		T	R	T	R	T	R
I	57.6 ± 7.2	0.69 ± 0.18	0.02 ± 0.01	0.62 ± 0.18	0.03 ± 0.01	0.47 ± 0.12	0.03 ± 0.02
II	57.7 ± 4.8	0.63 ± 0.14	0.01 ± 0.01	0.55 ± 0.11	0.02 ± 0.01	0.38 ± 0.05	0.03 ± 0.03
III	48.2 ± 4.0	0.52 ± 0.07	0.09 ± 0.03	0.47 ± 0.06	0.11 ± 0.05	0.39 ± 0.06	0.14 ± 0.07
IV	39.9 ± 5.0	0.58 ± 0.09	0.08 ± 0.02	0.55 ± 0.08	0.08 ± 0.02	0.48 ± 0.07	0.10 ± 0.04
V	48.7 ± 5.8	0.50 ± 0.06	0.11 ± 0.02	0.45 ± 0.05	0.10 ± 0.02	0.40 ± 0.05	0.12 ± 0.03
VI	36.9 ± 2.6	0.58 ± 0.08	0.08 ± 0.02	0.52 ± 0.07	0.10 ± 0.03	0.47 ± 0.07	0.10 ± 0.04
VII	49.9 ± 5.2	0.67 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.61 ± 0.05	0.05 ± 0.03	0.50 ± 0.03	0.10 ± 0.08
VIII	60.2 ± 5.1	0.56 ± 0.07	0.07 ± 0.02	0.50 ± 0.06	0.09 ± 0.06	0.38 ± 0.04	0.11 ± 0.06
IX	41.6 ± 4.3	0.47 ± 0.07	0.11 ± 0.03	0.43 ± 0.07	0.11 ± 0.03	0.37 ± 0.05	0.14 ± 0.05
X	49.2 ± 4.1	0.62 ± 0.03	0.07 ± 0.03	0.54 ± 0.02	0.08 ± 0.04	0.43 ± 0.02	0.12 ± 0.09

Табл.3. Оптические параметры волос различных типов, полученные инверсным методом Монте-Карло.

Номер серии	Красная компонента		Зеленая компонента		Синяя компонента	
	μ_a (см ⁻¹)	μ'_s (см ⁻¹)	μ_a (см ⁻¹)	μ'_s (см ⁻¹)	μ_a (см ⁻¹)	μ'_s (см ⁻¹)
I	14.5 ± 3.8	40.6 ± 17.4	19.7 ± 5.7	55.8 ± 29.1	34.8 ± 8.9	90.5 ± 48.3
II	28.5 ± 6.3	37.5 ± 18.8	38.6 ± 7.7	53.4 ± 35.6	68.3 ± 8.9	91.3 ± 91.3
III	1.68 ± 0.20	164.5 ± 54.8	3.05 ± 0.53	202.6 ± 92.1	6.4 ± 0.4	278.2 ± 126.5
IV	1.7 ± 0.7	161.1 ± 40.3	3.16 ± 0.12	172.2 ± 42.5	6.8 ± 0.3	229.1 ± 91.6
V	0.9 ± 0.1	175.4 ± 31.8	1.61 ± 0.15	200.7 ± 40.2	3.3 ± 0.4	246.2 ± 63.7
VI	0.75 ± 0.11	182.5 ± 61.1	1.07 ± 0.13	209.4 ± 72.5	1.68 ± 0.25	257.5 ± 102.8
VII	10.3 ± 1.1	78.4 ± 26.5	13.9 ± 2.3	102.8 ± 61.2	24.5 ± 2.9	155.2 ± 124.1
VIII	16.8 ± 4.2	99.4 ± 28.4	22.7 ± 5.5	132.1 ± 80.9	40.1 ± 7.8	203.1 ± 10.7
IX	0.36 ± 0.05	233.6 ± 63.6	0.68 ± 0.11	268.3 ± 83.1	1.4 ± 0.2	331.4 ± 118.2
X	8.71 ± 0.64	105.9 ± 45.1	11.9 ± 0.6	142.3 ± 71.3	20.9 ± 1.3	223.2 ± 167.3

Коэффициент поглощения седых волос имеет сравнительно малую величину, особенно в красной спектральной области. Седеющие волосы и волосы блондинов по своим поглощающим характеристикам занимают промежуточное положение. Подобный разброс хорошо объясняется структурно-морфологическими свойствами волоса. Для темных волос молодых людей характерно большое содержание меланина, который в основном и отвечает за поглощающие свойства волоса. К старости происходит разрушение меланосом волоса и прекращение выработки меланина, и в соответствии с этим мы видим, что волосы поседевшей женщины-штенки 70 лет имеют значительно меньший коэффициент поглощения по сравнению с волосами штенки более молодого возраста (19 лет). Коэффициент поглощения волос девушки-блондинки оказывается сравнимым с коэффициентом поглощения волос седеющего мужчины 45 лет. Спектральные зависимости коэффициентов поглощения для волос всех типов хорошо согласуются со спектральной зависимостью коэффициента поглощения меланина, подтверждая то, что поглощающие свойства волос определяются прежде всего их природным пигментом – меланином.

Из табл.3 также видно, что наиболее сильное рассеяние наблюдается для седых волос, что объясняется их структурно-морфологическими свойствами, а именно более шероховатой поверхностью, наличием пустот в волосе и т. д. Волосы темного цвета обладают значительно более слабо выраженными рассеивающими характеристиками, что, очевидно, связано с размерами рассеивателей в волосах данных типов и более плотной их упаковкой. И наконец, русые волосы по своим рассеивающим свойствам занимают промежуточное положение между волосами темного цвета (штенки и брюнетки) и седыми волосами. Интересно отметить, что по своим рассеивающим свойствам волосы блондинки подобны седеющим волосам русого типа, что говорит о сходном структурно-морфологическом строении волос этих типов.

Для большинства биотканей спектральная зависимость транспортного коэффициента рассеяния с хорошей точностью аппроксимируется степенной функцией вида $\mu'_s(\lambda) = a\lambda^{-w}$, где параметр a определяется концентрацией рассеивающих центров биоткани и отношением показателей преломления рассеивателей и окружающей их среды, а параметр w (волновой экспонент) характеризует средний размер рассеивателей и определяет спектральное поведение транспортного коэффициента рассеяния [3, 42, 43]. Параметр w , как правило, принимает значения от 1 до 4, причем $w = 4$ соответствует мелким, так называемым рэлеевским рассеивателям, в роли которых в

данном случае могут выступать отдельные кератиновые волокна волосяного фолликула, а $w = 1$ – крупным рассеивателям, так называемым рассеивателям Ми, в роли которых, по-видимому, выступают пузырьки воздуха в седых волосах. В табл.4 приведены результаты аппроксимации указанной степенной функцией значений транспортного коэффициента рассеяния, представленных в табл.3.

Из табл.4 видно, что волновой экспонент для темных и русых волос молодых людей равен ~ 3 , что говорит о преобладании в них достаточно мелких рассеивателей, в роли которых, по-видимому, выступают кератиновые волокна, их жгуты и гранулы меланина. Кроме того, насыщенность волос данных типов меланином (т. е. достаточно большое число меланиновых гранул) заставляет предположить, что меланиновые гранулы (по крайней мере в исследованных образцах) имеют субмикронные размеры. В противоположность этому для седых волос и волос блондинов параметр w близок к единице. Это свидетельствует о преобладании в волосах данных типов достаточно крупных рассеивателей, в роли которых могут выступать поверхностные чешуйки и внутренние пустоты волоса. Интересно отметить, что волновой экспонент для седеющих волос принимает промежуточное значение, равное ~ 2 , между его значениями для седых и не седых волос. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что основными рассеивателями для волос молодых людей являются гранулы меланина, а рассеяние в седых волосах определяется внутренними пустотами волоса.

Числитель аппроксимирующих выражений, приведенных в табл.4, характеризует в первую очередь число

Табл.4. Спектральная зависимость транспортного коэффициента рассеяния.

Номер серии	Выражение, аппроксимирующее спектральную зависимость транспортного коэффициента рассеяния
I	$\mu'_s \approx 9.599 \times 10^9 / \lambda^{3.014}$
II	$\mu'_s \approx 8.181 \times 10^{10} / \lambda^{3.362}$
III	$\mu'_s \approx 5.112 \times 10^7 / \lambda^{1.977}$
IV	$\mu'_s \approx 7.402 \times 10^5 / \lambda^{1.318}$
V	$\mu'_s \approx 6.383 \times 10^5 / \lambda^{1.282}$
VI	$\mu'_s \approx 7.687 \times 10^5 / \lambda^{1.305}$
VII	$\mu'_s \approx 1.043 \times 10^9 / \lambda^{2.564}$
VIII	$\mu'_s \approx 3.102 \times 10^9 / \lambda^{2.698}$
IX	$\mu'_s \approx 1.058 \times 10^6 / \lambda^{1.316}$
X	$\mu'_s \approx 6.487 \times 10^9 / \lambda^{2.803}$

Табл.5. Концентрация меланина в волосах различных типов.

Номер серии	Цвет волос	Концентрация меланина (мг/мл)	Концентрация меланина (мг/г)	Концентрация эумеланина (мг/мл)	Концентрация феомеланина (мг/мл)
I	Каштановый	3.61 ± 0.50	4.68 ± 0.65	2.93	0.68
II	Черный	7.07 ± 0.29	9.19 ± 0.38	5.74	1.33
III	Русый с сединой	0.82 ± 0.37	1.07 ± 0.41	0.11	0.71
IV	Белый	0.89 ± 0.22	1.17 ± 0.31	0.05	0.84
V	Седой	0.43 ± 0.03	0.56 ± 0.04	0.06	0.37
VI	Седой	0.16 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.14	0.02
VII	Темно-русый	2.52 ± 0.45	3.28 ± 0.51	2.09	0.43
VIII	Темно-русый	4.14 ± 0.83	5.38 ± 0.52	3.41	0.73
IX	Седой	0.20 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.02	0.18
X	Темно-русый	2.16 ± 0.81	2.81 ± 0.11	1.77	0.39

рассеивающих частиц в волосах различных типов. Из табл.4 видно, что для волос, принадлежащих молодым добровольцам, независимо от типа волос (темные или светлые) число рассеивателей весьма велико – порядка 10^9 , в то время как для седых волос (и волос блондинов) оно примерно на четыре порядка ниже и составляет $\sim 10^5$, что хорошо согласуется с приведенной схемой светорассеяния, т.е. для волос молодых людей (с большим количеством меланина) мы имеем большое число достаточно мелких, плотно упакованных рассеивателей, а для седых волос число рассеивателей намного меньше, но их размеры значительно больше и плотность упаковки меньше.

Концентрация меланина в волосах различных типов определялась минимизацией целевой функции (5) согласно методике, изложенной в разд.3, с использованием данных по коэффициентам поглощения, полученных с помощью инверсного метода Монте-Карло (табл.3), и результаты представлены в табл.5. Из нее видно, что максимальное содержание меланина наблюдается в темных волосах, в то время как в седых волосах и волосах блондинов оно пренебрежимо мало. Для сравнения полученных результатов с литературными данными (см. табл.1) концентрация меланина, выраженная в мг/мл, была пересчитана в мг/г с использованием плотности волоса 1.3 г/см^3 [44]. Найденные значения достаточно хорошо согласуются как с литературными данными, так и с данными, полученными нами при кислотно-щелочной экстракции меланина из черных волос. Так, для черных волос концентрация меланина, измеренная с помощью цветового анализа, составляет $9.19 \pm 0.38 \text{ мг/г}$, а концентрация меланина, определенная в результате его химической экстракции, равна $8.7 \pm 4.1 \text{ мг/г}$.

Из анализа литературных данных следует, что разброс значений концентрации меланина в волосах черного цвета составляет от 5.37 мг/г [17] до $31 \pm 14.7 \text{ мг/г}$ [18]. Для волос блондинов нами было найдено значение $1.17 \pm 0.31 \text{ мг/г}$, которое хорошо согласуется с данными (1.165 мг/г) работы [17]. Концентрация меланина, определенная нами для каштановых и темно-русых волос, лежит в пределах от $2.81 \pm 0.11 \text{ мг/г}$ (X серия) до $5.38 \pm 0.52 \text{ мг/г}$ (VIII серия). Анализ литературных данных показывает разброс концентраций меланина от 1.605 мг/г [17] до 5.55 мг/г [12], что также хорошо согласуется с полученными нами значениями. К сожалению, мы не нашли в литературе данных по содержанию меланина в седых и седеющих волосах, однако определенные нами значения хорошо согласуются с оптическими и структурно-морфологическими свойствами волос разных типов. В то же

время необходимо отметить, что используемое нами значение плотности волоса (1.3 г/см^3) является усредненным и может существенно зависеть от цвета и типа волос. Следует ожидать, что темные волосы молодых людей будут иметь большую плотность, а седые волосы – меньшую, что неизбежно вызовет коррекцию значений концентрации меланина.

Поскольку вопрос о типе меланина, определяющего цвет и оптические характеристики волос разных типов остается открытым, нами были оценены концентрации эумеланина и феомеланина для волос каждого типа. Результаты представлены в последних двух колонках табл.5. Концентрация эумеланина определялась как $C_{eu} = \varphi_{eu} \times C_m$, а концентрация феомеланина – как $C_{pheo} = (1 - \varphi_{eu}) C_m$ согласно методике, описанной в разд.3. Из представленных данных видно, что в волосах темного цвета доминирующим типом меланина является эумеланин, в то время как в светлых волосах преобладает феомеланин, что хорошо согласуется с данными работ [8–10, 12, 17]. В то же время необходимо отметить, что поскольку при проведении расчетов не учитывалось собственное поглощение остальных структурных компонентов волоса, например кератина, то учет этого поглощения может несколько изменить как суммарную концентрацию меланина в волосе, так и соотношение между концентрациями эумеланина и феомеланина.

5. Заключение

В настоящей работе разработана экспериментальная установка на основе цифрового анализа изображений и с помощью инверсного метода Монте-Карло выполнена оценка оптических свойств волос различных типов в трех спектральных диапазонах, соответствующих трем цветовым компонентам. Использование инверсного метода Монте-Карло впервые позволило разделить рассеивающие и поглощающие свойства волоса. Полученная для рассеивающих свойств волоса зависимость от длины волны хорошо согласуется со структурно-морфологическими свойствами волос различных типов. Анализ поглощающих свойств волос дал возможность оценить содержание меланина в волосах различных типов. Было показано, что в темных волосах доминирующим типом меланина является эумеланин, в то время как в светлых волосах – феомеланин.

В то же время требуется сопоставление полученных оптических параметров с данными стандартных спектрофотометрических измерений и строгое решение на их основе обратной оптической задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-02-16740) и CRDF (grants № REC-006/SA-006-00, Annex N. 07, Appendix 11 и PG05-006-2).

1. Тучин В.В. *Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях* (Саратов: Изд-во СГУ, 1998).
2. Tuchin V.V. *Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis* (Bellingham: SPIE Press, 2000, Vol. TT38).
3. Лопатин В.Н., Приезжев А.В., Апонасенко А.Д., Шепелевич Н.В., Лопатин В.В., Пожиленкова П.В., Простакова И.В. *Методы светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред* (М.: Физматлит, 2004).
4. Haywood R.M., Linge C. *Lasers Surg. Med.*, **35**, 77 (2004).
5. Hennessy A., Oh C., Diffey B., Wakamatsu K., Ito S., Rees J. *Pigment Cell Res.*, **18**, 220 (2005).
6. Kollias N. *Clinics in Dermatology*, **13**, 361 (1995).
7. Nicholls E.M. *Ann. Hum. Genet. Lond.*, **32**, 15 (1968).
8. Ito S., Jimbow K. *J. Invest. Dermatol.*, **80**, 268 (1983).
9. Menon I.A., Persad S., Haberman H.F., Kurian C.J. *J. Invest. Dermatol.*, **80**, 202 (1983).
10. Thody A.J., Higgins E.M., Wakamatsu K., Ito S., Burchill S.A., Marks J.M. *J. Invest. Dermatol.*, **97**, 340 (1991).
11. Wang X.J., Milner T.E., Dhond R.P., Sorin W.V., Newton S.A., Nelson J.S. *Opt. Lett.*, **20**, 524 (1995).
12. Napolitano A., Vincenzi M.R., Donato P.D., Monfrecola G., Prota G. *J. Invest. Dermatol.*, **114**, 1141 (2000).
13. Bashkatov A.N., Sinichkin Yu.P., Genina E.A., Tuchin V.V., Altshuler G.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4244**, 161 (2001).
14. Zimnyakov D.A., Simonenko G.V., Bashkatov A.N., Genina E.A., Lakodina N.A., Tuchin V.V., Altshuler G.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4244**, 156 (2001).
15. Зимняков Д.А., Симоненко Г.В., Башкатов А.Н., Генина Э.А., Лакодина Н.А., Тучин В.В., Альтшулер Г.Б. *ИТЭ*, **5**, 154 (2001).
16. Borges C.R., Roberts J.C., Wilkins D.G., Rollins D.E. *Anal. Biochemistry*, **290**, 116 (2001).
17. Ito S., Wakamatsu K. *Pigment Cell Res.*, **16**, 523 (2003).
18. Liu Y., Kempf V.R., Nofsinger J.B., Weinert E.E., Rudnicki M., Wakamatsu K., Ito S., Simon J.D. *Pigment Cell Res.*, **16**, 355 (2003).
19. Zoccola M., Mossotti R., Innocenti R., Loria D.I., Rosso S., Zanetti R. *Pigment Cell Res.*, **17**, 379 (2004).
20. Andreassi L., Flori L. *Clinics in Dermatology*, **13**, 369 (1995).
21. Barel A.O., Clarys P., Alewaeters K., Duez C., Hubinon J.-L., Mommaerts M. *Skin Res. Technol.*, **7**, 24 (2001).
22. Clarys P., Alewaeters K., Lambrecht R., Barel A.O. *Skin Res. Technol.*, **6**, 230 (2000).
23. Dolotov L.E., Sinichkin Yu.P., Tuchin V.V., Utz S.R., Altshuler G.B., Yaroslavsky I.V. *Lasers Surg. Med.*, **34**, 127 (2004).
24. Hata J., Shimada M., Yamada Y., Uchida A., Itoh M., Nakayama Y., Yatagai T. *J. Biomed. Opt.*, **8**, 93 (2003).
25. Hermanns J.F., Pierard-Franchimont C., Pierard G.E. *Int. J. Cosm. Sci.*, **22**, 67 (2000).
26. Jung B., Choi B., Durkin A.J., Kelly K.M., Nelson J.S. *Lasers Surg. Med.*, **34**, 174 (2004).
27. Kim C.-S., Kim M.K., Jung B., Choi B., Verkruysse W., Jeong M.Y., Nelson J.S. *Lasers Surg. Med.*, **37**, 138 (2005).
28. Rubegni P., Cevenini G., Stanghellini E., Andreassi M., Sbrano P., Fabiani P., Andreassi L. *Int. J. Cosmetic Sci.*, **24**, 187 (2002).
29. Stamatias G.N., Kollias N. *J. Biomed. Opt.*, **9**, 315 (2004).
30. Vertuani S., Ziosi P., Solaroli N., Buzzoni V., Carli M., Lucchi E., Valgimigli L., Baratto G., Manfredini S. *Skin Res. Technol.*, **9**, 245 (2003).
31. Kenet R.D. *Clinics in Dermatology*, **13**, 381 (1995).
32. Jones L.N. *Clinics in Dermatology*, **19**, 95 (2001).
33. Nogueira A.C.S., Joekes I. *J. Photochem. Photobiol. B*, **74**, 109 (2004).
34. Рук А., Даубер Р. *Болезни волос и волосистой части головы* (М.: Медицина, 1985).
35. Meglinsky I.V., Matcher S.J. *Monte Carlo Methods and Appl.*, **6**, 15 (2000).
36. Меглинский И.В. *Квантовая электроника*, **31**, 1101 (2001).
37. Jacques S.L., Wang L. *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue*. Ed. by A.J.Welch, M.J.C. van Gemert (New York: Plenum Press, 1995, p. 73).
38. Chan D., Schulz B., Rubhausen M., Wessel S., Wepf R. *J. Biomed. Opt.*, **11**, 014029 (2006).
39. Банди Б. *Методы оптимизации* (М.: Радио и связь, 1988).
40. Prael S.A., van Gemert M.J.C., Welch A.J. *Appl. Opt.*, **32**, 559 (1993).
41. Jacques S. <http://omlc.ogi.edu/spectra/melanin/index.html>.
42. Mourant J.R., Fuselier T., Boyer J., Johnson T.M., Bigio I.J. *Appl. Opt.*, **36**, 949 (1997).
43. Schmitt J.M., Kumar G. *Appl. Opt.*, **37**, 2788 (1998).
44. Чернова О.Ф. <http://bio.1september.ru/article.php?ID=200301501>.