

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ДИФфуЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ КОЖИ**Я.А. Разумов¹, И.А. Серебрякова¹, Ю.А. Сурков¹, Э.А. Генина^{1,2}, В.В. Тучин^{1,2,3}**¹*Саратовский государственный университет, г. Саратов*²*Томский государственный университет, г. Томск*³*ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», г. Саратов***Аннотация**

Работа направлена на создание основы для разработки алгоритмов цветокоррекции и количественных методов оценки биохимических параметров кожи на основе доступных оптических измерений. В данном исследовании смоделированные спектры диффузного отражения человеческой кожи с различным содержанием меланина (1–50%) и уровнем гематокрита (10–50%) в диапазоне длин волн 400–1000 нм хорошо согласуются с экспериментальными данными *in vivo*, полученными методами дерматоскопии и спектроскопии диффузного отражения.

Ключевые слова: диффузное отражение, меланин, гематокрит, моделирование методом Монте-Карло, спектроскопия кожи, неинвазивная диагностика.

Введение

Неинвазивная оценка концентрации меланина и уровня гематокрита, представляет значительный интерес для ранней диагностики анемии, воспалительных и онкологических заболеваний кожи, а также для персонализированной фототерапии [1]. Однако точность и надежность неинвазивных оптических методов в значительной степени зависят от индивидуальных вариаций содержания хромофоров кожи, таких как концентрация меланина и уровень гемоглобина в биологических тканях. В этом контексте моделирование методом Монте-Карло позволяет систематически исследовать влияние ключевых хромофоров на спектры диффузного отражения в широком диапазоне физиологически значимых параметров, тем самым обеспечивая основу для повышения точности и достоверности исследований *in vivo* [2].

Материалы и методы

Транспорт фотонов в многослойных биологических тканях моделировался с использованием платформы «Cloud Monte Carlo for Light Transport» [3], которая позволяет выполнять численное моделирование распространения света с заданными пользователем оптическими параметрами.

Исследование *in vivo* было проведено на различных участках кожи добровольца со II фототипом кожи по Фицпатрику. Спектры диффузного отражения кожи регистрировались в диапазоне 400–1000 нм с использованием спектрометра USB4000-UV-VIS (OceanOptics, США), оснащенного Y-образным зондом QR400-7-VIS-NIR (OceanOptics, США). Регистрация спектров проводилась на коже руки, подбородка, шеи и спины. Во время измерений условия освещения были стандартизированы. Для каждой точки было получено 5 повторных измерений с последующим усреднением. На основании полученных данных оценивались индекс эритемы и индекс меланина.

Цифровые изображения исследуемых участков кожи были получены с помощью дерматоскопа FireflyDE 300 (Firefly, Германия) при 10-кратном увеличении и разрешении 1920 × 1080 пикселей. Смоделированные данные сравнивались с экспериментально измеренными спектрами диффузного отражения кожи человека.

Результаты

Смоделированные изображения кожи и спектры диффузного отражения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (400–1000 нм) демонстрируют характерные изменения, обусловленные вариациями концентраций хромофоров (см. рисунок 1). Увеличение содержания меланина снижает отраженное излучение во всем видимом спектральном диапазоне, особенно в коротковолновой области. Повышение уровня гематокрита коррелирует с увеличением абсорбции в полосах поглощения гемоглобина (~415, 542 и 577 нм).

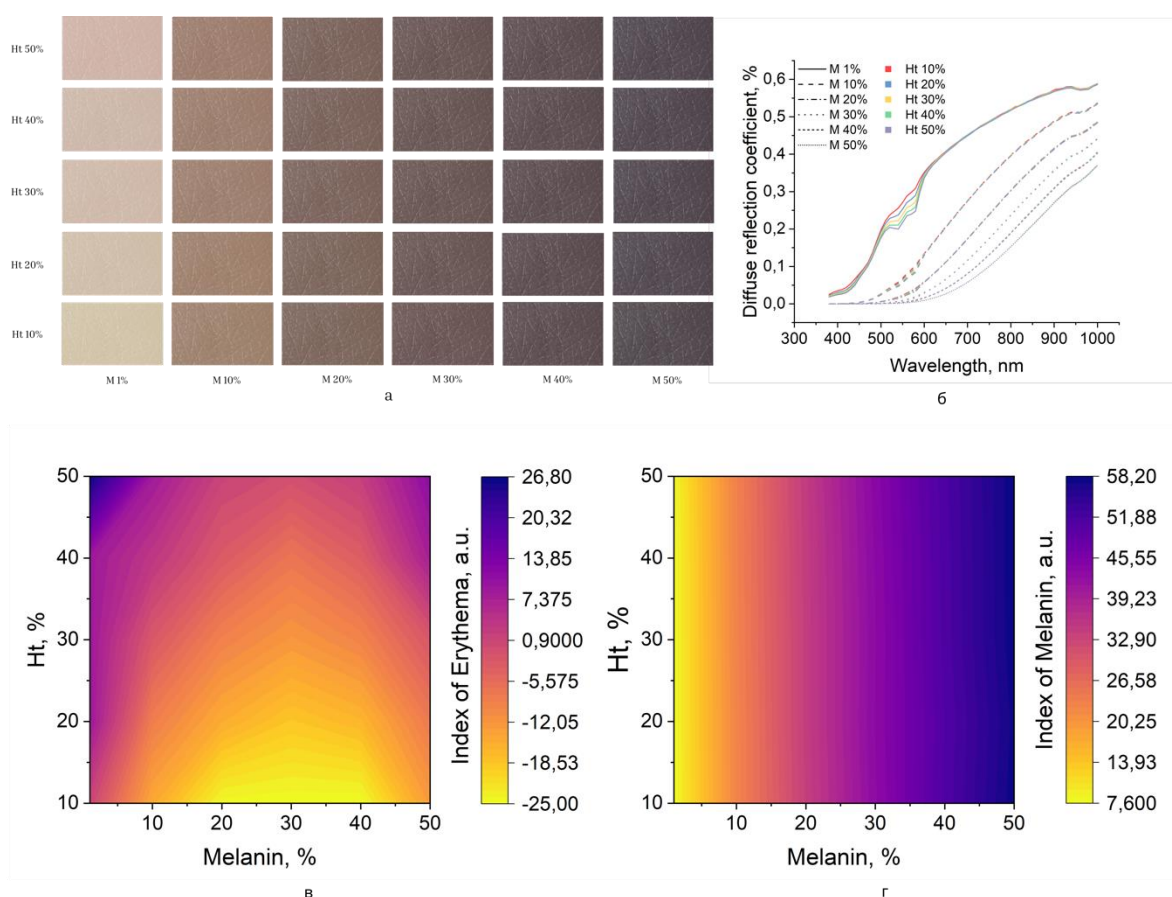


Рисунок 1– Смоделированные изображения и спектры диффузного отражения кожи: (а) изображения участков кожи с различной концентрацией меланина (М) (от 1% до 50%) и уровнем гематокрита (Ht) (от 10% до 50%), (б) смоделированные спектры коэффициента диффузного отражения кожи в диапазоне длин волн (400–1000 нм) при различных концентрациях меланина (от 1% до 50%) и гематокрита (от 10% до 50%), и соответствующие (в, г) цветové карты индекса меланина и индекса эритемы

Экспериментальные *in vivo* данные продемонстрировали различия индекса эритемы и индекса меланина для участков кожи с различной степенью пигментации,

включая пигментные невусы, родимое пятно и область витилиго (см. рисунок 2). Наблюдаемые изменения качественно согласуются с результатами моделирования: повышение содержания меланина сопровождается уменьшением уровня отражения в видимой области спектра, а увеличение вклада кровенаполнения проявляется в усилении особенностей спектра в областях поглощения гемоглобина. Таким образом, экспериментальные спектры и рассчитанные индексы подтверждают, что модель корректно отражает вклад меланина и гемоглобина в формирование спектров диффузного отражения кожи.

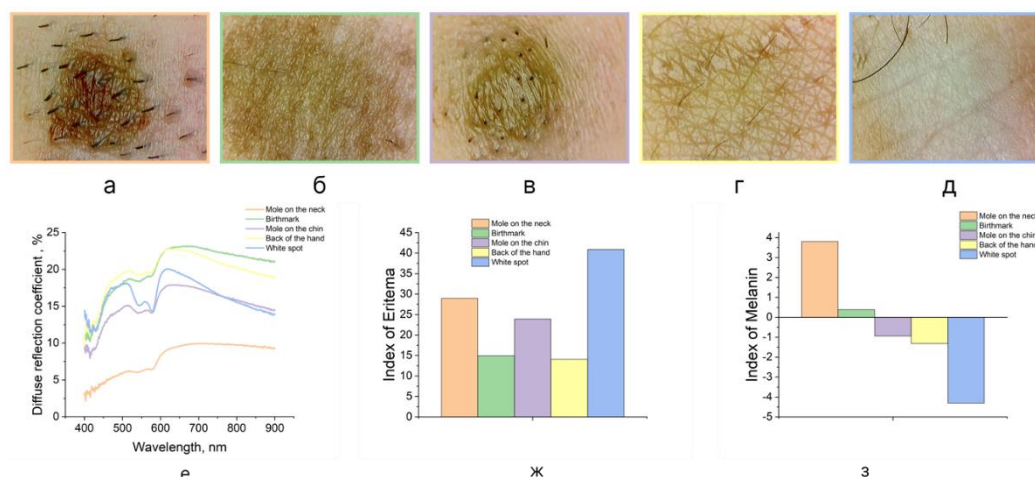


Рисунок 2 – Цифровые изображения: (а) невус на шее (melo on the neck), (б) родимое пятно на спине (birthmark), (в) невус на подбородке (melo on the hand), (г) тыльная сторона ладони (back of the hand), (д) область витилиго на пальце (white spot), (е) соответствующие им спектры диффузного отражения, (ж, з) индексы эритемы и меланина, соответственно

Закключение

Полученные результаты показывают, что библиотека смоделированных спектров диффузного отражения может использоваться как опорная база для решения обратной задачи: по измеренному спектру подбирать диапазоны параметров кожи, соответствующие содержанию меланина и уровню гематокрита/эритемы. В прикладном плане это может быть использовано для калибровки и цветокоррекции дерматоскопических изображений, а также для разработки алгоритмов предварительной неинвазивной оценки пигментации и эритемы.

Список использованных источников

1. Robot Operating System 2 (ROS2). – URL: <https://docs.ros.org/en/jazzy/index.html> (дата обращения: 01.04.2026).
2. Gazebo Simulator. – URL: <https://gazebo.org/home> (дата обращения: 01.04.2026).
3. PX4 Autopilot. – URL: <https://px4.io/> (дата обращения: 02.04.2026).
4. Liu, X. Intelligent UAVs trajectory optimization from space-time for data collection in social networks / X. Liu, H. Song, A. Liu // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. – 2020. – V. 8, № 2. – P. 853–864.

5. Wakode, M. S. Role of AI and Big Data Analytics in UAV-Enabled IoT Applications for Smart Cities / M. S. Wakode // Unmanned Aerial Vehicles for Internet of Things (IoT) Concepts, Techniques, and Applications. – 2021. – P. 193–205.

MODELING OF SKIN DIFFUSE REFLECTANCE SPECTRA

Ya.A. Razumov¹, I.A. Serebryakova¹, Y.I. Surkov¹, E.A. Genina^{1,2}, V.V. Tuchin^{1,2,3}

¹*Saratov State University, Saratov*

²*Tomsk State University, Tomsk*

³*FRC “Saratov Scientific Centre of the RAS,” Saratov*

e-mail: razumok2006@gmail.com

Abstract

The work aims to establish a foundation for developing color-correction algorithms and quantitative methods for assessing skin biochemical parameters based on accessible optical measurements. In this study, simulated diffuse reflectance spectra of human skin with varying melanin content (1–50%) and hematocrit levels (10–50%) in the 400–1000 nm wavelength range are in a well agreement with experimental *in vivo* data obtained using dermatoscopy and diffuse reflection spectroscopy.

Keywords: diffuse reflectance, melanin, hematocrit, Monte Carlo simulation, skin spectroscopy, non-invasive diagnostics.