

Разработка эталона для поверки системы автоматизированной морфометрии клинических изображений новообразований кожи

© Е.Н. Римская¹, К.Г. Кудрин², И.А. Аполлонова¹, Н.В. Черномырдин^{1,3}, А.П. Николаев¹,
А.Н. Брико¹, Д.В. Давыдов², И.В. Решетов^{2,4,5}

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

² Академия постдипломного образования ФГБУ ФНКЦ ФМБА России,
125371 Москва, Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия

⁴ Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова,
119991 Москва, Россия

⁵ Институт кластерной онкологии ПМГМУ им. И.М. Сеченова
119991 Москва, Россия

e-mail: romehelen@gmail.com, reshetoviv@mail.ru

Поступила в редакцию 07.12.2019 г.

В окончательной редакции 13.02.2020 г.

Принята к публикации 28.02.2020 г.

Рассмотрены технологические и метрологические особенности создания эталона для калибровки и поверки системы автоматизированной морфометрии изображений новообразований кожи с целью диагностики меланомы кожи. Сформулированы требования к эталону. Разработан технологический процесс изготовления эталона на основе термотрансферной печати. Определены основные технологические параметры печати: температура должна составлять 180°C, скорость переноса изображения — 2.0 s/inch. Погрешность воспроизведения цвета при изготовлении эталона составляет не более $\Delta E^*_{ab} = 2.5$ (CIELAB 1976), погрешность воспроизведения геометрических размеров составляет не более 0.02%.

Ключевые слова: изображающие системы, меланома кожи, эталон, поверка, калибровка.

DOI: 10.21883/OS.2020.06.49415.54-20

Введение

Пигментные новообразования на коже, в состав которых входят невусные клетки, присутствуют у каждого человека. Чаще всего они являются доброкачественными и делятся на врожденные или приобретенные [1,2]. Среднее количество невусов у каждого человека варьирует от 3 до 100 и увеличивается с возрастом [3]. Однако из доброкачественного невуса может развиваться такое опасное злокачественное новообразование как меланома. При этом определить, какой невус является потенциально меланомоопасным, а какой меланомонеопасным, является сложной задачей дифференциальной диагностики, так как клинико-анатомические данные (возраст пациентов, локализация очагов поражения, клинические параметры и др.) сильно варьируют [4–7]. В настоящее время диагностика пигментных новообразований кожи при помощи традиционной биопсии затруднена в связи с тем, что любое травмирующее воздействие на них (частичное удаление, электрокоагуляция, криотерапия, воздействие химическими и другими агентами) не допускается в медицинской практике, так как может стать провоцирующим фактором для их малигнизации [8–10].

Перспективным решением проблемы диагностики пигментных новообразований кожи является цифровая

обработка оптических изображений. При этом значительное развитие элементной базы оптической визуализации и программного обеспечения делает данное решение крайне привлекательными [11–13]. Также следует отметить, что стремительное развитие систем визуализации на большинстве мобильных платформ (мобильные телефоны и планшеты) предоставляют возможность разрабатывать персонализированные методы раннего скрининга и поддержки принятия решений в области цифровых возможностей диагностики новообразований кожи конкретного человека [14–17]. При этом более высокотехнологичные методы обработки и распознавания параметров новообразований требуют более высоких и стабильных параметров качества клинических изображений новообразований кожи для обеспечения максимальной чувствительности и специфичности диагностики. Это в свою очередь требует особых подходов к разработке новых методов диагностики, в частности методик исследований и испытаний технических средств измерений и программного обеспечения на эталонах, фантомах и образцах тканей *ex vivo* и *in vivo*.

Использование цифровых технологий при диагностике меланомы кожи взаимосвязано с высокой достоверностью распознавания параметров изображений новообразований кожи, т. е. при измерении комплекса простран-

ственно-цветовых характеристик изображений новообразований кожи необходимо минимизировать погрешности измерений таким образом, чтобы они не превышали допустимые значения. Метрологический подход решения такой задачи предусматривает выбор оптимального соотношения между допускаемыми погрешностями используемого технического средства измерения и эталона, применяемого для его поверки. Чем больше это соотношение, тем с большей достоверностью и точностью определяется погрешность технического средства измерения при поверке. Предъявляемые к эталону требования являются взаимоисключающими. Чем точнее разрабатываемый эталон, тем он дороже, сложнее его эксплуатация, ниже надежность (требуется более бережное обращение с ним, строгое соблюдение режима применения и т.д.). Большое значение имеет постоянство, воспроизводимость параметров эталона: большой диапазон разброса параметров эталона допускается только при достаточно большом соотношении погрешностей эталона и средства измерения. На практике это соотношение принимается равным от 1:5 до 1:10 при поверке средств измерения, не требующих определения поправок, и от 1:2.5 до 1:5 при определении поправок к показаниям средств измерения. При этом учитывают вид погрешностей, метод поверки и допускаемые значения ошибок первого и второго рода (число неправильно забракованных и число неправильно признанных годными средств измерения по результатам их поверок) [18–20].

Настоящая работа посвящена технологическим особенностям создания эталона для определения цветовых и геометрических параметров новообразований кожи на цифровых изображениях. Область применения разрабатываемого эталона не ограничивается медициной. Он также может применяться в сферах, где для решения поставленных задач требуется получение корректных значений пространственно-цветовых характеристик цифровых изображений. Эталон имеет простой вид, что удобно для быстрого и правильного его обнаружения на изображениях при сегментации: пластиковая карта с цветовой панелью RGB. Оригинальный технологический метод создания эталона позволяет достаточно корректно решить задачу поверки и калибровки изображающих систем для морфометрии клинических изображений пигментных новообразований кожи: обеспечивается корректное измерение параметров размеров, формы и цвета. Экспериментальным путем были установлены наиболее подходящие параметры термотрансферной печати: температура для нанесения изображения эталона на пластиковую карту (180.0°C), а также скорость переноса изображения на карту (2.0 s/inch), при которых осуществлялся качественный перенос изображения.

Требования к эталону

Корректное измерение размеров, формы и цвета пигментных новообразований кожи требует калибров-

ки и поверки изображающих систем, регистрирующих клинические изображения. Для этого был разработан специальный эталон (тестовый объект), к которому предъявлялись следующие требования:

- наличие RGB-шкалы для калибровки и поверки при измерениях параметров цвета пигментных новообразований кожи (цвет, интенсивность пигментации);
- наличие шкалы размеров (mm) для калибровки и поверки при измерениях параметров размеров и формы пигментных новообразований кожи (максимальный и минимальный диаметры, площадь);
- простая структура, оптимальная для автоматической сегментации изображений;
- безопасность для врача и пациента (отсутствие острых углов, гипоаллергенность);
- малый размер;
- низкая стоимость материалов.

В качестве основы для эталона была выбрана пластиковая карта прямоугольной формы размером 85 на 54 mm при толщине менее 1 mm и радиусом скругления углов 3 mm (международный стандарт ISO 7810), изготовленная из поливинилхлорида (ПВХ) [21]. Композитный ПВХ более предпочтителен, чем обычный, для достижения качества печати и соответствия требованиям ISO.

Особенности колориметрии цвета

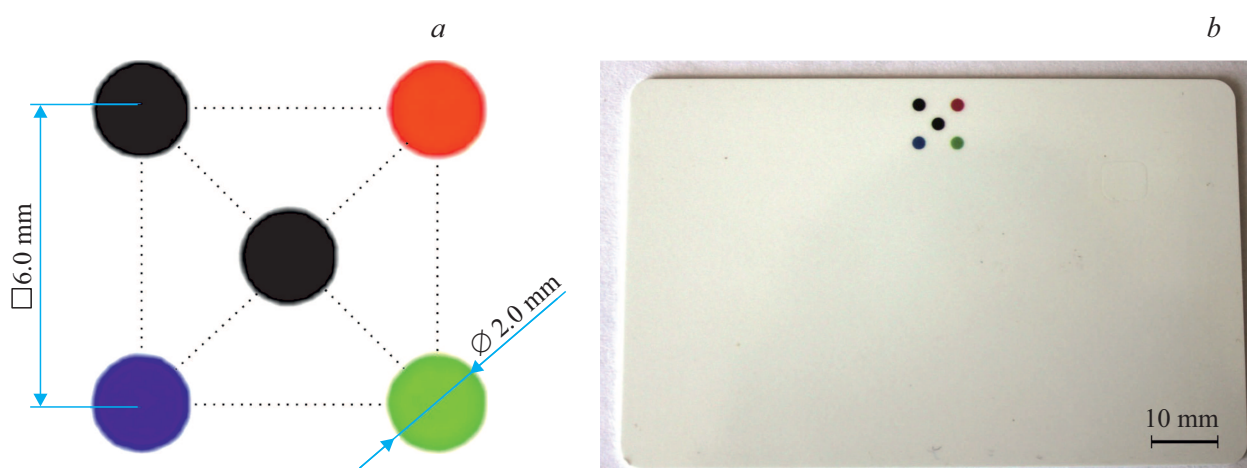
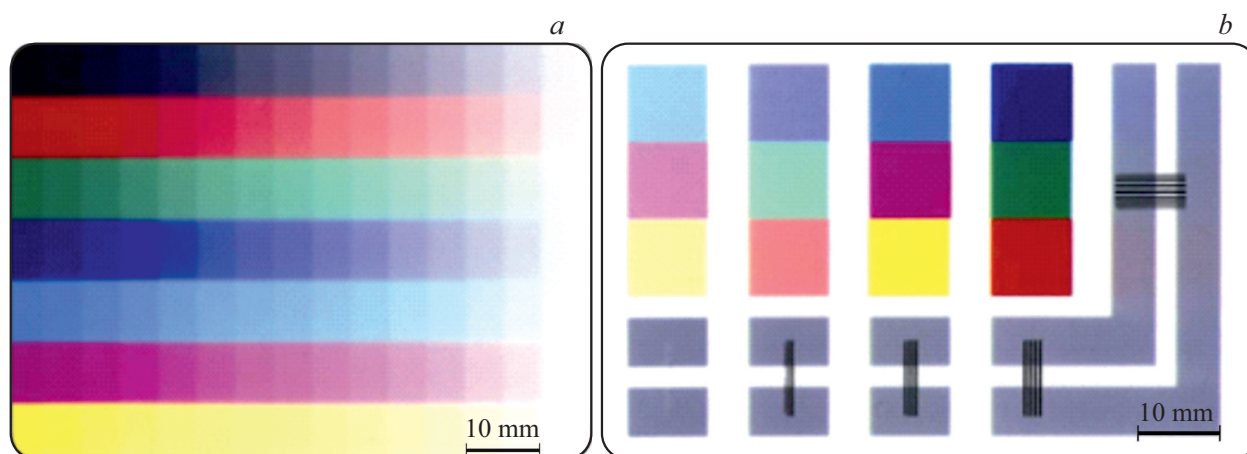
За приведение всех изображений к единой цветопередаче отвечает цветная калибровка по эталону. По результатам цветокалибровки по эталону вычисляется вектор цветовой ошибки и по нему устраняется ошибка для каждого пикселя (вычитается). Благодаря такой цветокалибровке учитывается баланс белого, который позволяет повысить точность определения резкости границы, а также помогает устранить геометрические искажения, связанные с отклонением от перпендикулярности, и определить цвета новообразований (светло-коричневый, коричневый, темно-коричневый, желто-коричневый, серый, голубоватый, розово-пурпурный и черный) [21].

Технологический процесс изготовления эталона

Эталон по заданным требованиям возможно изготовить с помощью технологии термотрансферной печати с последующим процессом ламинирования. Выбор цветов эталона обусловлен особенностями выходного цветового пространства цифровой фотокамеры (цветовая модель RGB) (рис. 1) [21–23]. Для термотрансферной печати эталона на пластиковой карте предлагается принтер высокой четкости для печати на пластиковых картах (например, HDP5000 с двухсторонним ламинированием, Fargo Electronics, технические характеристики которого приведены в табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики принтера

Наименование	Описание
Допустимая толщина используемых карт	Только печать: от 0.030" до 0.050"/ от 0.762 mm до 1.27 mm Печать/ламинирование: от 0.030" до 0.040"/ от 0.762 mm до 1.02 mm
Допустимые типы электронных карт	Proximity-карты HID Prox, контактные и бесконтактные Smart-карты Mifare, iClass.
Допустимые типы карт	ABS, PVC, PET, PETG, Proximity карты, контактные Smart-карты, карты с магнитными полосами и оптические карты памяти.
Чистка карт	Сменный чистящий картридж (в комплекте с каждой печатной лентой)
Цветовая гамма	Полноцветная - 16.7 миллиона цветов и 256 оттенков на пиксель
Цветовое разрешение (dpi)	300 dpi (11.8 dots/mm)
Относительная влажность	От 20% до 80% без конденсации влаги
Максимально допустимая ширина карты	2.125"/54 mm
Максимально допустимая длина карты	3.375"/85.6 mm
Рабочая температура	От 65.F до 90.F (от 18.C до 32.C).

Рис. 1. Эталон для регистрации изображений: *a* — модель эталона, *b* — фотография напечатанного эталона.Рис. 2. Встроенные тесты: *a* — встроенный тест цветной печати, *b* — встроенный тест YMSK.

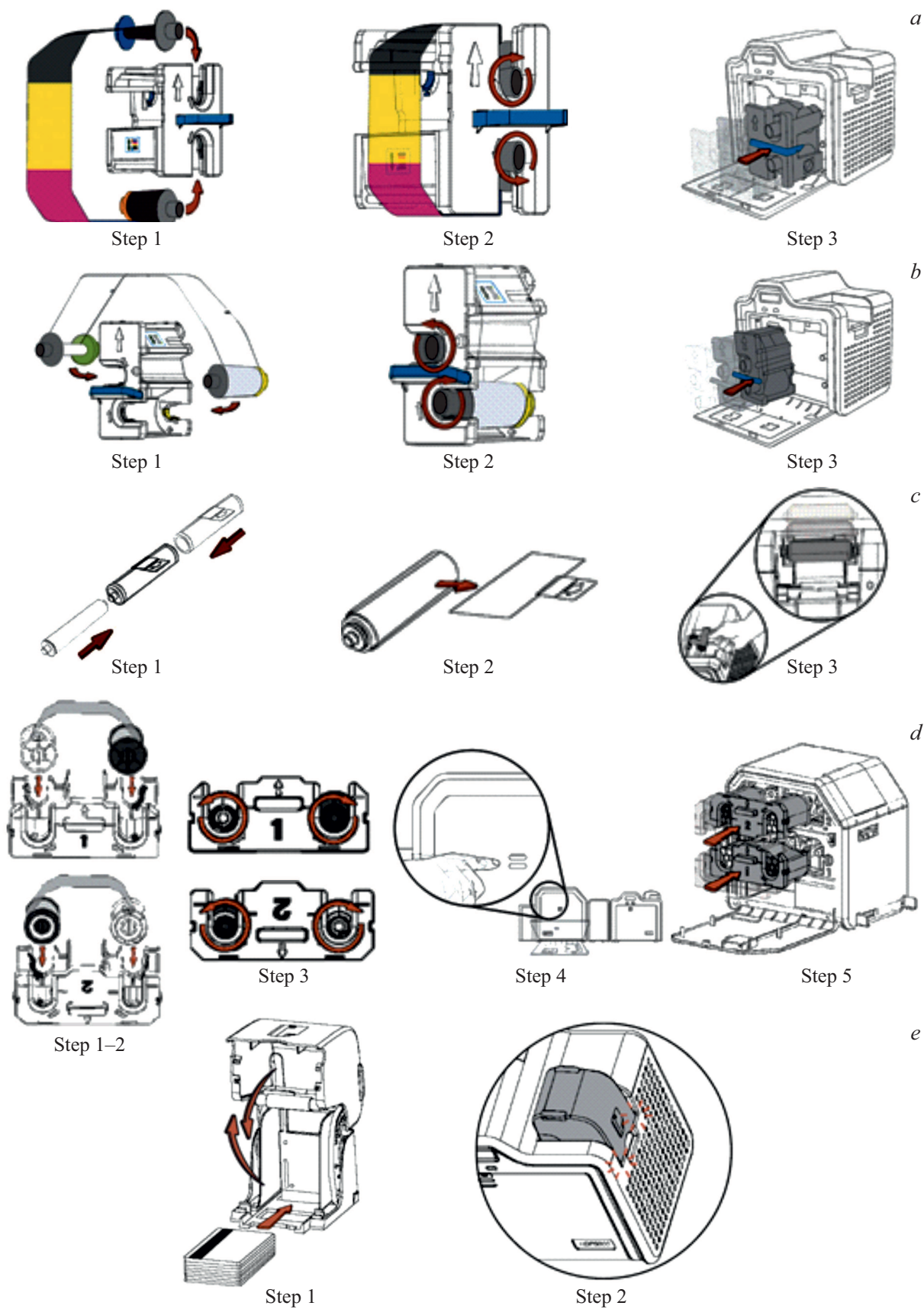
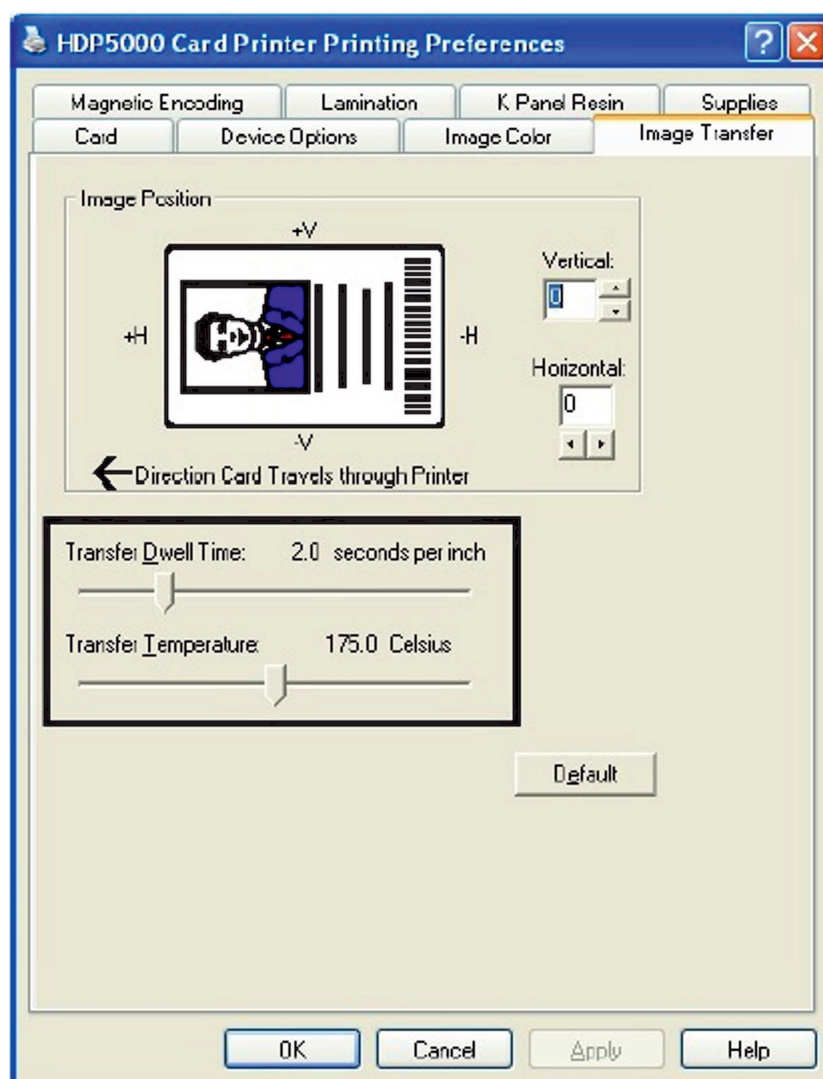
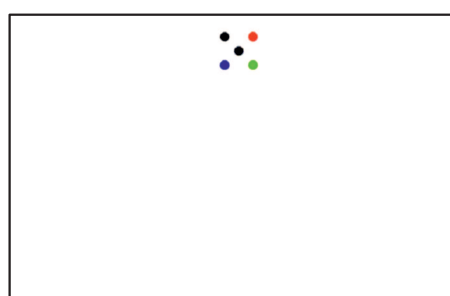


Рис. 3. Технологический процесс изготовления эталона: *a* — операция № 1, *b* — операция № 2, *c* — операция № 3, *d* — операция № 4, *e* — операция № 5, *f* — операция № 6, *g* — операция № 7.

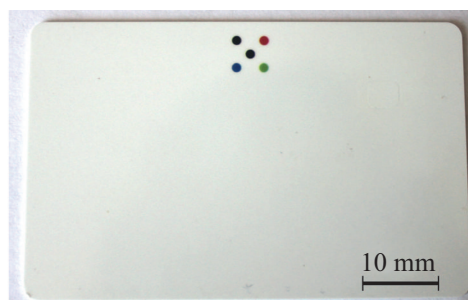


f

Step 1



Step 1



Step 2-4

g

Рис. 3 (продолжение).

Операция термотрансферной печати представляет собой реализацию термического сублимационного метода переноса изображения. Термическая сублимация — это процесс переноса изображения под воздействием температуры и давления со специальной красящей ленты на пластиковую карту [21,24–27]. Красящая лента разде-

лена на несколько следующих друг за другом цветных сегментов. Сегменты сгруппированы в повторяющуюся серию цветов: желтого, красного, голубого и черного (YMCKO: yellow, magenta, cyan, black, overcoat) по всей длине печатающей ленты. Принтер всегда печатает сначала желтый сегмент, потом красный, потом голубой и

Таблица 2. Технологический процесс изготовления эталона

№ операции	Наименование и содержание операций	Технологическая оснастка	Примечание
1	Установка печатной ленты: Шаг 1. Вставить печатную ленту в картридж печатной ленты до щелчка. Шаг 2. Натянуть печатную ленту. Шаг 3. Вставить картридж печатной ленты в принтер до щелчка (рис. 3, а).	Перчатки резиновые технические	Натянуть печатную ленту так, без провисания
2	Установка чистой несущей ленты HDP Film: Шаг 1. Вставить несущую ленту HDP Film в картридж несущей ленты до щелчка. Шаг 2. Натянуть несущую ленту HDP Film. Шаг 3. Вставить картридж несущей ленты HDP Film в принтер (рис. 3, б).	Перчатки резиновые технические	Натянуть несущую ленту так, без провисания
3	Установка чистящего картриджа: Шаг 1. Вынуть чистящий картридж из упаковки печатной ленты и вставить его в черный шпиндель из упаковки принтера Шаг 2. Удалить защитную пленку с чистящего картриджа. Шаг 3. Вставить чистящий картридж в соответствующее гнездо (рис. 3, в).	Перчатки резиновые технические	Аккуратно удалить защитную пленку с чистящего картриджа, придерживая шпиндель двумя пальцами по бокам, не касаясь защитной пленки
4	Установка ламинационной ленты: Шаг 1. Распаковать ламинационную ленту. Шаг 2. Установить рулоны ламинационной ленты в соответствующие гнезда. Шаг 3. Натянуть рулоны ламинационной пленки. Шаг 4. Вставить картриджи ламинационной пленки в ламинационный модуль до щелчка. Шаг 5. Закрыть переднюю крышку ламинационного модуля (рис. 3, д).	Перчатки резиновые технические	
5	Загрузка чистых карт: Шаг 1. Загрузить чистые карты в загрузочный лоток. Важно: лицевая сторона карты должна быть обращена ВНИЗ. Обратная сторона карты должна быть обращена ВВЕРХ. Шаг 2. Закрепить загрузочный лоток на принтере до щелчка (рис. 3, е).	Перчатки резиновые технические. Ветошь	Аккуратно с помощью ветоши удалить с карт насевшие частицы пыли
6	Установка температуры нанесения и времени переноса изображения: Шаг 1. Выбор температуры для нанесения рисунка и время переноса в панели Image Transfer (рис. 3, ф).	Диск с программным обеспечением Мышь	Температура нанесения рисунка эталона на пластиковую карту 180°С, время переноса составляет 2 s/inch
7	Получение эталона: Шаг 1. Изображение лицевой стороны эталона в Photoshop. Шаг 2 . Печать эталона на принтере. Шаг 3. Ламинирование эталона. Шаг 4. Изъятие эталона из модуля забора карт ламинационного модуля (рис. 3, г).	Перчатки резиновые технические. Мышь	Размер изображения: 1004×638 pixels

черный. Сверху накладывается прозрачное защитное покрытие overcoat. Когда лента проходит под печатающей головкой, сотни термоэлементов внутри печатающей головки нагревают ее. Во время нагрева ленты под воз-

действием температуры красящий слой с ее поверхности переносится на поверхность пластиковой карты. Для каждого из цветовых сегментов на ленте обеспечивается отдельное прохождение печатающей головки [28–31].

Комбинируя цвета каждого сегмента и изменяя температуру, используемую для перехода этих цветов, можно печатать до 16.7 миллионов различных оттенков цвета. Это позволяет осуществлять плавный переход одного цвета в другой, обеспечивая фотореалистичное качество печати изображения (в результате данного процесса цвета смешиваются ровно и гладко, и получается фотографическое, а не точечное изображение) [31–33]. Согласно ISO 12647-2, погрешность воспроизведения цвета при офсетной печати должна составлять не более $\Delta E^*_{ab} = 2.5$ (CIELAB 1976). Геометрические размеры должны воспроизводиться с погрешностью не больше 0.02%.

Основными технологическими параметрами термотрансферной печати являются температура и скорость переноса изображения. Выбор температуры переноса изображения на карту зависит от материала карты и находится в диапазоне от 150.0 до 190.0°C. Для пластиковых карт из поливинилхлорида значение температуры находится в диапазоне от 175.0 до 190.0°C [21,34]. Диапазон скорости переноса составляет от 1.0 до 3.0 s/inch.

Экспериментальным путем мы установили, что наиболее подходящая температура для нанесения изображения эталона на пластиковую карту составляет 180.0°C, скорость переноса изображения составляет 2 s/inch. Основным критерием оценки качества переноса изображения была оценка наличия дефектов при термотрансферной печати. Выбор такого критерия обусловлен физическими принципами, лежащими в основе термотрансферной печати: адгезия и скорость диффузии красителей. Процессы адгезии и диффузии зависят от температуры и времени процесса. В то же время перегрев может привести к деформации пластиковой карты. Поэтому в ходе эксперимента были оптимизированы параметры: температура и скорость переноса изображения. Проверку корректности цветопередачи при печати возможно выполнить с помощью встроенных тестов, содержащих палитры цветовых пространств RGB и YMCK (Color Bars Self Test — рис. 2, а, YMCK Self Test — рис. 2, б).

Для защиты пластиковых карт от износа и воздействия ультрафиолета на них в процессе печати возможно нанести защитную полиэфирную плёнку (термотрансферную ламинационную ленту) [35–37]. Термотрансферная ламинационная лента представляет собой относительно тонкий материал, способный покрывать карту полностью и обеспечивать средний уровень износостойкости и сохранности карты. Лак или пленка наносятся при температуре от 140 до 190°C. Экспериментальным путем было установлено, что наиболее подходящая температура нанесения пленки на карту 170°C. При такой температуре нанесение плёнки происходит без искажений и не происходит перегрева пластиковой карты. Технологические операции процесса изготовления эталона представлены в табл. 2.

Применение эталона

Разработанный эталон позволяет проводить поверку системы автоматизированной морфометрии клинических изображений новообразований кожи. Основным способом применения эталона заключается в непосредственной калибровке системы: автоматическое определение масштаба регистрируемого изображения и коррекция цветопередачи цифровой камеры. Алгоритм калибровки следующий:

- эталон регистрируется цифровой камерой одновременно с новообразованием (эталон размещается в непосредственной близости, в поле зрения цифровой камеры);
- выполняется сегментация изображения и происходит обнаружение элементов эталона (5 областей);
- измеряются геометрические размеры и координаты цвета R,G,B каждого элемента цветовой палитры эталона;
- по координатам цвета R,G,B вычисляется вектор цветовой ошибки и по нему устраняется ошибка для каждого пикселя (цветокалибровка);
- устраняются искажения изображения, связанные с отклонением от перпендикулярности оптической оси при регистрации изображений [38];
- вычисляется масштаб изображения (цифровое разрешение в размерности pixel/mm).

Погрешность воспроизведения цвета при изготовлении эталона составляет не более $\Delta E^*_{ab} = 2.5$ (CIELAB 1976), погрешность воспроизведения геометрических размеров составляет не более 0.02% (согласно ISO 12647-2). Погрешности существенно меньше, чем допустимые погрешности измерения параметров размеров, формы и цвета при автоматизированной диагностике пигментных новообразований кожи [39], следовательно, эталон обеспечивает поверку и калибровку системы автоматизированной морфометрии клинических изображений новообразований кожи.

Благодаря такому подходу к разработке эталона, снижению погрешности нахождения цвета и размеров новообразований данный подход найдёт свое применение в решении фундаментальных и прикладных задач корректного и более точного получения комплекса пространственно-цветовых характеристик изображений.

Заключение

Обоснован и разработан технологический процесс изготовления эталона для поверки системы автоматизированной морфометрии клинических изображений новообразований кожи. Эталон позволяет проводить поверку и калибровку изображающей системы: автоматическое определение масштаба регистрируемого изображения и коррекцию цветопередачи цифровой камеры. Применение эталона способствует увеличению чувствительности

и специфичности при проведении диагностики пигментных новообразований кожи с помощью автоматизированной морфометрии клинических изображений. Погрешность воспроизведения цвета при изготовлении эталона составляет не более $\Delta E^*ab = 2.5$ (CIELAB 1976), погрешность воспроизведения геометрических размеров составляет не более 0.02% (согласно ISO 12647-2) и не превышает допустимые погрешности при морфометрии клинических изображений пигментных новообразований кожи. Представленный эталон позволяет использовать метод диагностики на основе морфометрии клинических изображений на большинстве мобильных платформ (мобильных телефонах и планшетах), что в свою очередь позволит разрабатывать персонализированные методы раннего скрининга и поддержки принятия решений в области диагностики новообразований кожи конкретного человека.

Соблюдение этических стандартов

Настоящая работа не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

Финансирование работы

Разработка технологического процесса изготовления эталона для проверки системы автоматизированной морфометрии клинических изображений новообразований кожи поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 18-38-00958. Разработка эталона и его параметров выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-29-02099.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Sreelatha T., Subramanyam M.V., Giri Prasad M.N. // J. Medical Systems. 2019. V. 43. N 190. P. 190. doi 10.1007/s10916-019-1334-1
- [2] Mehrotra A., Huskamp H.A., Souza J., Uscher-Pines L., Rose S., Landon B.E. et al. // Health Aff (Millwood). 2017. V. 36. N 5. P. 909. doi 10.1377/hlthaff.2016.1461
- [3] Swetter S.M., Johnson T.M., Miller D.R., Layton C.J., Brooks K.R., Geller A.C. // Arch Dermatol. 2009. V. 145. N 4. P. 397. doi 10.1001/archdermatol.2008.603
- [4] Williams H.A., Fritschi L., Beauchamp C., Katris P. // Melanoma Res. 2006. V. 16. N 4. P. 341. doi 10.1097/01.cmr.0000205023.02527.ab
- [5] Carr S., Smith C., Wernberg J. // Surgical Clinics. 2019. V. 100. N 1. P. 1. doi https://doi.org/10.1016/j.suc.2019.09.005
- [6] Klebanov N., Gunasekera N.S., Lin W.M., Hawryluk E.B., Miller D.M., Reddy B.Y., Christman M.P., Beaulieu D., Rajadurai S., Duncan L.M., Sober A.J., Tsao H. // J. American Academy of Dermatology. 2019. V. 80. N 1. P. 178. doi 10.1016/j.jaad.2018.08.028
- [7] Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I., Siegel R.L., Torre L.A., Jemal A. // CA: a Cancer J. for Clinicians. 2018. V. 68. N 6. P. 394. doi 10.3322/caac.21492
- [8] Wu X., Oliveria S.A., Yagerman S., Chen L., DeFazio J., Braun R., et al. // JAMA Dermatol. 2015. V. 151. N 5. P. 489. doi 10.1001/jamadermatol.2014.3837
- [9] Galanzha E.I., Menyayev Y.A., Yadem A.C., Sarimollaoglu M., Juratli M.A., Nedosekin D.A., Foster S.R., Jamshidi-Parsian A., Siegel E.R., Makhoul I., Hutchins L.F., Suen J.Y., Zharov V.P. // Science Translational Medicine. 2019. V. 11. N 496. P. eaat5857. doi 10.1126/scitranslmed.aat5857
- [10] Eggermont A., Spatz A., Robert C. // The Lancet. 2014. V. 1. N 383(9919). P. 816. doi 10.1016/S0140-6736(13)60802-8
- [11] Nikolaou V., Stratigos A.J. // British J. Dermatology. 2014. V. 170. N 1. P. 11. doi 10.1111/bjd.12492
- [12] Tsao H., Olazagasti J.M., Cordoro K.M., Brewer J.D., Taylor S.C., Bordeaux J.S., Chren M.M., Sober A.J., Tegeler C., Bhushan R., Begolka W.S. // J. American Academy of Dermatology. 2015. V. 72. N 4. P. 717. doi 10.1016/j.jaad.2015.01.025
- [13] Siegel R.L., Miller K.D., Jemal A. // CA Cancer J. for Clinicians. 2016. V. 66. N 1. P. 7. doi 10.3322/caac.21332
- [14] Ganster H., Pinz P., Rohrer R., Wildling E., Binder M., Kittler H. // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2001. V. 20. N 3. P. 233. doi 10.1109/42.918473
- [15] Masood A., Al-Jumaily A.A. // International J. Biomedical Imaging. 2013. V. 2013. P. 1. doi 10.1155/2013/323268
- [16] Isasi A. Gola, Zapirain García B., Méndez Zorrilla A. // Computers in Biology and Medicine. 2011. V. 41. N 9. P. 742. doi 10.1016/j.compbio.2011.06.010
- [17] Singh N., Gupta S.K. // Skin Research and Technology. 2018. V. 25. N 2. P. 129. doi 10.1111/srt.12622
- [18] Грановский В.А., Сиряя Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
- [19] Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. Изд-во стандартов, 1991. 227 с.
- [20] Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Энергоатомиздат, 1985. 304 с.
- [21] Усиков В.Д. Материалы для изготовления пластиковых карт. Серия „Производство пластиковых карт“. Выпуск 3-й. Издательские решения. 2018. № 3. 72 с.
- [22] Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. Питер Пресс, 2009. 224 с.
- [23] Sharma A. Understanding Color Management, Second Edition. John Wiley & Sons. 2018. 384 p. doi 10.1002/9781119223702
- [24] Mizen M.B. // Society for Imaging Science and Technology. 2016. N 5. P. 392.
- [25] Xu Y., Dong X., Cheng J. // Proc. 3rd Int. Conf. on Machinery, Materials and Information Technology Applications. 2015. P. 1647.
- [26] Hirotoshi T., Toshifumi N., Noboru T., Ikuo H. // Society for Imaging Science and Technology. 2000. N 4. P. 775.
- [27] Walters C.D. // American Library Association. 2004. V. 23. N 1. P. 30.
- [28] Yoshi O., Takara I., Hirotoshi T. // Society for Imaging Science and Technology. 2003. N 4. P. 383.
- [29] Drees F., Grethen H., Nisius R., Pekruhn W. // IEEE Proc. VLSI and Computer Peripherals. COMPEURO 89. 1989. P. 40. doi 10.1109/CMPEUR.1989.93368

- [30] Cui H., Zhang Y., Shi X., Gong F., Xiong X., Kang X., Xing G., Li S. // PLOS. 2019. V. 14. N 6. P. 1. doi 10.1371/journal.pone.0216460
- [31] Onishi H., Mima S., Nankou T., Kohashi T. // IEEE Transactions on Electron Devices. IEEE. 1993. V. 40. N 1. P. 69. doi 10.1109/16.249426
- [32] Udi C. // Society for Imaging Science and Technology. 2002. N 5. P. 125.
- [33] Sahni O. // Proc. SPIE. 1991. V. 1458. P. 4. doi 10.1117/12.46326
- [34] Telfer S.J., Vetterling W.T. // Society for Imaging Science and Technology. 2005. N 4. P. 181.
- [35] Grove S.M. // Elsevier. 1988. V. 19. N 5. P. 367. doi 10.1016/0010-4361(88)90124-3
- [36] Tumkor S., Turkmena N., Chassapis C., Manoochehri S. // International Communications in Heat and Mass Transfer. Elsevier. 2001. V. 28. N 1. P. 49. doi 10.1016/S0735-1933(01)00212-3
- [37] Li H., Xu Y., Zhang T., Niu K., Wang Y., Zhao Y., Zhang B. // Polymer Testing. Elsevier. 2020. V. 81. P. 106209. doi 10.1016/j.polymertesting.2019.106209
- [38] Римская Е.Н., Щадько А.О., Аполлонова И.А., Николаев А.П., Брико А.Н., Дешин И.А., Бережной П.Ю., Кудрин К.Г., Зайцев К.И., Тучин В.В., Решетов И.В. // Опт. и спектр. 2019. Т. 126. № 5. С. 584. doi 10.21883/OS.2019.05.47657.6-19
- [39] Kudrin K.G., Matorin O.V., Reshetov I.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 584. N 1. P. 012001. doi 10.1088/1742-6596/584/1/012001