

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЦВЕТА И СТРУКТУРЫ РАДУЖКИ В РАЗЛИЧНЫХ НАУКАХ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ В АНТРОПОЛОГИИ

А.А. Дорофеева¹, Ю.В. Лоскутова¹, А.В. Хрусталева², Ю.В. Крылов², М.А. Негашева¹

¹ Кафедра антропологии биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

² Кафедра «Биомедицинские технические системы» МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

В статье рассматриваются данные научной литературы по изучению цвета и структуры радужки в биометрии, медицине и антропологии в настоящее время.

Первая часть статьи посвящена изучению цвета и структуры радужки как уникальной биометрической характеристики в целях идентификации личности. Особое внимание уделено основным анатомо-морфологическим свойствам радужки, диктующим требования к системам распознавания. Представлена схема, которую реализуют современные методы автоматического распознавания радужки по ее изображениям.

Вторая часть статьи посвящена исследованиям пигментации и структуры радужки в медицине. По литературным данным описаны важные взаимосвязи количества пигмента с болезненными состояниями органа зрения, методы исследования и регистрации количества меланина. Также представлены результаты оценки функционального статуса человека некоторыми медиками на базе комплекса индивидуальных иридоглифических показателей.

В третьей части статьи предложены современные разработки в области методического подхода к исследованию цвета глаз в антропологических исследованиях при помощи компьютерных технологий. Предложен унифицированный подход, исходя из требований объективной оценки фенотипических особенностей пигментации радужки, когда одной из основных проблем является методическая сопоставимость результатов, полученных разными специалистами. Источниками этой проблемы могут быть либо несопоставимость применяемых методов, либо субъективные ошибки исследователей. В связи с этим в настоящее время весьма актуальным является применение инструментальных методов определения особенностей пигментации (вместо описательных шкал), а также унификация полученных материалов, которая может быть достигнута автоматической компьютерной обработкой первичных антропологических данных (например, изображений радужки) с помощью специального программного обеспечения. В данной статье представлены результаты авторской инновационной разработки программного обеспечения, предназначенного специально для автоматического определения цвета глаз по антропологической 12-ти классовой шкале Бунака на базе цифровых фотографий радужки, полученных с помощью прибора – иридоскопа. На основе цифровых фотографий и предложенного программного обеспечения, являющихся предметом сотрудничества Биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Научно-исследовательского и испытательного центра биометрической техники МГТУ имени Н.Э. Баумана, оказалась возможной визуализация 12-ти классовой шкалы Бунака в виде компьютерных цифровых изображений. Разработанное программное обеспечение может оказаться весьма актуальным и востребованным для демонстрации музейных этнографических экспозиций на новом высококачественном уровне компьютерных технологий; для учебных целей при иллюстрации вариантов пигментации радужки в различных популяциях человека, а также для прикладного использования.

В заключение рассматриваются перспективы изучения цвета и структуры радужки в антропологических исследованиях с применением новых компьютерных технологий и способы усовершенствования имеющихся методик определения цвета глаз на основе молекулярно-генетических исследований.

Ключевые слова: антропология, методы определения цвета глаз, методы изучения структуры радужки, компьютерные технологии для изучения особенностей радужки

Исследование цвета и структуры радужки¹ в биометрии

Одной из наиболее востребованных областей применения результатов исследования цвета и структуры радужки является биометрия. Радужка как биометрическая характеристика человека отличается универсальностью и уникальностью для каждого индивида, высокой стабильностью параметров цвета и структуры, а также удобством регистрации [Кухарев, 2001]. Статистически подсчитанная вероятность ложного допуска при автоматическом распознавании радужки составляет около 0.2%, а вероятность ложного недопуска составляет около 2%. Для всех прочих биометрических систем такая вероятность ложного допуска достигается лишь при неприемлемых значениях недопуска в десятки процентов [Матвеев, Ганькин, 2004; Xiaoyan, Pengfei, 2007].

Информативность уникальных микроанатомических различий в радужке учитываются даже в медицине в подготовке и процессе хирургического вмешательства [Каган, Канюков, Урбанский, 2005; Урбанский, 2004].

Согласно исследованиям иридологов, форма и, особенно, окраска некоторых элементов радужки может изменяться достаточно быстро (в течение нескольких дней). Однако в биометрии используется полутонное изображение радужки, и некоторые пигментные изменения не заметны. Считается, что количество элементов радужки столь велико, что при сравнении двух эталонов достаточно совпадения лишь 30% параметров, чтобы считать с вероятностью ошибки не более 10^{-6} , что эталоны принадлежат одному человеку (по статистическим расчетам).

В настоящее время применение изображений радужки в биометрии регламентируется ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-6-2006 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 6. Данные изображения радужной оболочки глаза». Данный стандарт устанавливает требования к формату обмена биометрическими данными изображения радужки, к техническим средствам и условиям регистрации изображений радужки [ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-6, 2006].

¹ Здесь и далее в тексте согласно современной анатомической терминологии [Международная анатомическая терминология, 2003] применяется термин «радужка», хотя ранее в антропологической литературе использовался термин «радужина» [Бунак, 1941; Рогинский, Левин, 1955; Хрисанфова, Перевозчиков, 2002].

Однако существующие биометрические системы распознавания личности по радужке не нашли широкого применения по ряду причин, основная из которых заключается в том, что технические характеристики средств регистрации и обработки изображений радужки не согласованы с анатомо-физиологическими особенностями радужки.

Радужка является передней частью сосудистого русла глаза, расположенной между роговицей и хрусталиком, и имеет форму усеченного конуса с отверстием в виде зрачка вдоль оси симметрии, совпадающей с оптической осью глаза. Значение диаметра радужки, характеризующее размер ее внешней границы, находится в диапазоне 9.5 – 13.7 мм и составляет в среднем 12 мм – вертикальный и горизонтальные размеры могут различаться на 0.5 – 0.7 мм [Кобаева, 2002; ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-6, 2006]. Диаметр зрачка зависит от большого числа факторов и может составлять от 2 до 8 мм [Вельховер, Ананин, 1991].

Высота конуса (толщина радужки) изменяется от 0.2 мм в на границе с цилиарным телом до 0.4 мм в области автономного кольца [Сомов, 2005]. Значительные отклонения поверхности радужки от плоскости приводят к формированию дополнительных требований к минимальной глубине резко отображаемого пространства аппаратно-программных средств для регистрации изображений радужки.

Особо стоит выделить изменения радужки, вызванные изменением формы зрачка. При аккомодации толщина хрусталика меняется от 3.6 до 5 мм, что приводит к смещению центральной части радужки относительно периферической.

При сокращении/расширении зрачка радужка деформируется хоть и нелинейно, но радиально-симметрично. Поэтому, используя модель радужки, можно с большей точностью предсказать, куда сдвинется и какую форму примет данный элемент радужки при том или ином изменении размера зрачка. Однако при изменении формы зрачка растяжение различно вдоль разных радиусов. Поэтому система, претендующая на высокую надежность, должна запоминать форму зрачка и учитывать ее изменения при регистрации или нормировать картину радужки к круглому зрачку, используя радиально-асимметричное преобразование.

Структурной единицей стромы радужки, определяющей вместе с цветом ее индивидуальный структурно-хроматический узор, является трабекула – мезодермальный тяж, соответствующий сосудистому анастомозу между большим и малым артериальными кругами радужки. Диапазон вариаций диаметра трабекул составляет от 70 до

120 мкм, поэтому разрешающая способность систем регистрации изображений радужки должна быть согласована с данным параметром, что не всегда выполняется в существующих биометрических системах.

В течение различных физиологических процессов в радужке можно наблюдать изменения, имеющие значение для биометрического сопоставления, такие как изменения размера и формы зрачка, изменения формы и окраски элементов радужки. Под воздействием изменений освещенности, при перемещении фокуса внимания и в зависимости от физического и психического состояния зрачок живого глаза постоянно меняет свой размер. Зрачок также совершает аperiodические самопроизвольные движения (гиппус). В результате этих движений зрачка изменяется размер радужки и соответственно деформируется ее рисунок. При изменении размеров зрачка участки радужки деформируются тем сильнее, чем ближе они к зрачку. Детально этим вопросом занимались в Научно-исследовательском и испытательном центре Биометрической техники МГТУ им. Н.Э. Баумана, сотрудниками которого предложен комплекс геометрических параметров радужки, изучены зависимости его значений от освещенности, а также определены условия регистрации иридоглифических изображений [Спиридонов, 2003; Хрусталева, Спиридонов, 2005].

От внешней среды радужка защищена роговицей, и поэтому любое исследование радужки *in vivo* должно проводиться с учетом особенностей этой среды. Диаметр роговицы взрослого человека колеблется от 10 до 12 мм. Радиус кривизны передней поверхности роговицы составляет в среднем от 7.6 до 7.8 мм, задней поверхности – около 6.8 мм, толщина в центральной части – 0.5–0.9 мм [Хацевич, 1998]. С воздухом граничит только ее передняя поверхность, задняя же соприкасается с водянистой влагой передней камеры, показатель преломления которой мало отличается от такового роговицы ($n_p = 1,376$. $n_{\text{вв}} = 1.336^2$). В этих условиях роговица работает как сильная положительная линза, при этом переднее и заднее фокусные расстояния ее составляют 23.22 мм и 31.03 мм, соответственно, что необходимо учитывать в сборе биометрического материала. Кроме того, зеркально отражая свет, предназначенный для освещения радужки, роговица формирует яркие блики на изображении, которые могут маскировать часть аксиологической информации.

² n_p – показатель преломления роговицы, $n_{\text{вв}}$ – показатель преломления водянистой влаги.

Существуют также специфические условия регистрации изображения, такие как подсветка. Уникальность каждой радужки определяется особенностями пространственного распределения цветности ее стромы. В зависимости от длины волны света, в котором регистрируется радужка, на ней проявляются различные детали, причем их выраженность зависит от типа цвета глаз. Например, большинство светлых глаз дает наиболее четкий рисунок в видимом свете. Напротив, структуры темных глаз четко проявляются в инфракрасном диапазоне. Подсветка должна давать в области регистрации радужек освещенность, в несколько раз превышающую ту, что создается посторонними источниками. Показано, что сходимость результатов измерения параметров цвета и структуры обеспечивается при освещенности радужки от 200 до 500 лк. Видимый свет с такой интенсивностью вызывает большое неудобство. Возможный вариант – вспышка, как в фотоаппарате.

В существующих биометрических системах распознавания личности для освещения радужки используются инфракрасная подсветка, поэтому зарегистрированные изображения являются не контрастными и утрачивают уникальные свойства, присущие радужке. Стандартами рекомендован свет 700–900 нм (ближний ИК).

Также требуется специфическая ориентация регистрируемого объекта относительно камеры, а именно конкретное пространственное положение: радужка – объект небольшого размера, и для получения ее изображения приемлемого качества (в фокусе и достаточного разрешения) требуется весьма точное позиционирование глаз (головы) пользователя. Особую сложность представляет угловая ориентация радужки относительно камер, то есть ее поворот относительно оси – луча зрения камеры [Ives, Bonney, Etter, Du, 2004; Abhyankar, Hornak, Schuckers, 2005].

Все существующие в настоящее время методы автоматического распознавания радужки глаза по ее изображениям реализуют следующую схему:

- выделение области интереса (радужки) на изображении,
- нормирование размеров изображения радужки,
- преобразование в полярную систему координат (иногда неявное),
- вычисление признаков и формирование из них эталона радужки,
- сравнение двух наборов признаков. [Кухарев, 2001; Dorairaj, Schmid, Fahmy, 2005].

В биометрических системах распознавания по радужке прослеживаются некоторые особенности. Преобразование, используемое для получения признаков, должно быть инвариантным к изменению яркости и контрастности изображения, тренду яркости, Гауссову шуму. Метод сравнения наборов признаков должен быть устойчив к тому, что часть признаков может быть недоступна (алгоритмы отбраковки век, ресниц, бликов указали, что соответствующие участки радужки закрыты) или, что хуже, искажена (алгоритмы отбраковки ошиблись и не исключили закрытый участок, и его данные считаются доброкачественными). Система распознавания по радужке компенсирует это большим резервом информативности признаков в незакрытых частях. В 1994 г. фирма «Иридиан» зарегистрировала патент на этот метод биометрического распознавания по радужке. В настоящее время начинают развиваться коммерческие биометрические проекты на базе различных научных разработок [Byungjun, Huysuk, Gyundo et al., 2004; Ives, Bonney, Etter, 2005; Chohg, Teoh, Ngo, 2005; Hyung, Seungin, Kwanghyuk et al., 2004; Yong, Jiu-Qiang, 2005]. Однако сложность структуры, формы и расположения радужки, высокая вариабельность ее параметров, обусловленная изменением диаметра зрачка, определяет специфические требования к условиям и средствам регистрации изображений радужки и методам их обработки, ввиду чего автоматические системы идентификации по радужке не находят пока широкого применения.

Исследование цвета и структуры радужки в медицине

В медицинской практике в настоящее время многие диагностические критерии дистрофических, дегенеративных и воспалительных заболеваний радужки основаны на описательных, относительных и, во многом, субъективных показателях, к которым относится и наблюдаемое при этих заболеваниях изменение цвета радужки [Вельховер, Ананин, 1991]. Количественная оценка содержания меланина в радужке может служить объективным критерием при ряде патологических состояний, в том числе и при открытоугольной глаукоме. Отечественные офтальмологи разработали экспериментальную установку, позволяющую неинвазивными методами отражательной спектроскопии и цифрового анализа изображений радужки выполнять оценку, как содержания, так и пространственного распределения меланина

и крови в радужке. С целью выявления корреляции между содержанием пигмента меланина в образцах и их цветовыми характеристиками, были проведены модельные измерения цветовых характеристик растворов меланина различной концентрации методом отражательной спектроскопии. Модельная среда представляла собой плоский слой толщиной 450 мкм, что соответствует реальным геометрическим параметрам радужки. Предполагалось, что доминирующими рассеивателями являются мелкие частицы с фактором анизотропии рассеяния g порядка 0.2. В качестве исходного спектра поглощения модельной среды (0) взят спектр поглощения феоомеланина при значении его концентрации в среде, равном 1 мг/мл. Измерения спектров пропускания и отражения осуществлялось при помощи волоконно-оптического датчика и спектрометра ЛЭСА-6м. Источником белого света служила галогенная лампа мощностью 200 Вт. С использованием специального программного обеспечения проводился цифровой анализ цветных изображений радужки и дальнейшее сравнение со спектральными характеристиками различных модельных сред. В результате чего выявлено, что концентрация меланина в норме составила 2.6 ± 0.4 мг/см³ для голубых глаз, 3.0 ± 1.7 мг/см³ для карих глаз и 2.4 ± 0.4 мг/см³ для зеленых глаз. У пациентов, страдающих первичной открытоугольной глаукомой, данные значения составили 2.5 ± 0.6 мг/см³ для голубых глаз, 2.2 ± 0.2 мг/см³ для карих глаз, 1.6 ± 0.4 мг/см³ для зеленых глаз.

Таким образом, была выявлена существенная разница в содержании меланина у здоровых лиц и у пациентов, страдающих первичной открытоугольной глаукомой, что, по мнению авторов, может быть критерием диагностики данного заболевания. Авторами также предложено отслеживать динамику содержания пигмента меланина в радужке путем анализа ее цветового изображения [Долотов, Синичкин, Коблова и др., 2007; Коблова, Каменских, Башкатов, 2007; Коблова, Сергеева, Башкатов, 2004].

В клинической практике при открытоугольной глаукоме для увеличения оттока внутриглазной жидкости применяют препарат латанапрост, который побочно стимулирует меланогенез в меланоцитах радужки и приводит к ее потемнению [Cracknell, Grierson, Hogg, 2008; Pappas, Pusin, Higginbotham, 1998].

Для наблюдения динамики изменения пигментации радужки в процессе лечения глаукомы японские ученые предлагают использовать специальное программное обеспечение. Изображение на цветном мониторе сформировано комбинацией

точек – пикселей. В соответствии с цветовой системой RGB, цвет каждого пикселя определяется суммарной интенсивностью красного, зеленого и синего цветов в этой точке. Предлагаемое программное обеспечение на выделенной оператором области изображения производит оценку интенсивности каждого из трех цветовых составляющих (используется градация Adobe Photoshop от 0 до 255). Программа подсчитывает общую и среднюю RGB интенсивность. Например, общая интенсивность красного (интенсивность красного в каждом пикселе от 1 до 255) \times (количество пикселей в выделенной области). Средняя интенсивность красного – это (общая интенсивность красного) / (255 \times количество пикселей в выделенной области). Таким образом, при сопоставлении нескольких фотографий одного и того же глаза в процессе лечения, сделанных при одинаковых условиях освещения, данная программа позволит выявить различия цветовых характеристик. Авторы провели апробацию программного обеспечения на фотографиях радужек людей, больных глаукомой, до и после лечения. Результаты были следующими: до лечения средняя интенсивность цветов радужки была R 0.92, G 0.77, B 0.56; после девятимесячного лечения препаратом латанопрост средняя интенсивность цветовых составляющих составила R 0.65, G 0.59, B 0.48. Интенсивность всех RGB-составляющих снизилась после лечения, это говорит о том, что радужка стала темнее, (т.к. R 0, G 0, B 0 – соответствуют черному цвету). Таким образом, предложенное программное обеспечение для измерения интенсивности трех цветовых составляющих дает объективную оценку изменения цвета радужки, наблюдаемого в клинической практике [Otake, Kumagai, Inagaki et al., 2002].

Другие исследователи построили оптическую модель радужки, позволяющую выявить зависимость между структурными особенностями данной биоткани и ее цветовыми оттенками, определяющими цвет глаз. Радужная оболочка при расчетах моделировалась системой плоских слоев, содержащих дискретные рассеивающие центры, погруженные в однородное вещество с другими оптическими постоянными. Характерные размеры рассеивателей определялись согласно данным электронной микроскопии, их форма в первом приближении предполагалась сферической. Спектральная зависимость коэффициента поглощения определяется экспериментально измеренным спектром меланина. На основе полученных спектральных характеристик рассчитаны цветовые координаты и проанализированы закономерности изменения цвета в зависимости от параметров дисперсных систем. Разработана программа для

наглядной демонстрации цвета рассеивающих систем на экране монитора компьютера, проведены оценки диапазона изменения цветовых оттенков и чистоты цвета, проанализировано влияние размеров рассеивающих частиц и глубины залегания слоя меланиновых гранул на наблюдаемый цветовой оттенок [Скапцов, Максимова, 2006].

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработано специальное программное обеспечение для определения 4 основных типов пигментации радужки: темно-коричневого, светло-коричневого, серого, серого с гетерохромией [Krylov, Khrustaley, Spiridonov, 2008].

В профилактических целях медицина долгое время ищет возможности адекватной оценки функционального статуса и адаптивных возможностей человека.

В настоящее время не существует методов объективной оценки функционального статуса человека, за исключением подходов, предложенных в 1999 г. Н.В. Делоне и В.Г. Солониченко и основанных на измерении параметров информативных морфогенетических вариантов – «аномальных вариантов морфологии отдельных органов или тканей, не имеющих медицинского значения» [Делоне, Солониченко, 1999]. Особое место среди них занимают иридоглифические исследования, основанные на анализе морфологических и цветовых параметров радужки. Отличительные черты иридоглифических исследований обусловлены ее анатомо-физиологическими особенностями и проявляются в виде особых требований к условиям и средствам регистрации, методам обработки изображений радужки.

Рядом исследователей [Галимуллин, 1990; Вельховер, 1992; Сафина, 2000] предложены различные методики иридоглифических исследований функционального статуса человека. Ф.З. Галимуллиным предложена методика, основанная на анализе 15-и иридоглифических параметров: применение данной методики для профессионального отбора в военизированной горноспасательной части Печорского бассейна в течение трех лет позволило в 2 раза снизить число дней нетрудоспособности горноспасателей [Галимуллин, 1990]. В работе Р.Б. Сафиной показана взаимосвязь комплекса иридоглифических параметров с психосоматическими и психоневрологическими особенностями функционального статуса индивида [Сафина, 2000]. Е.С. Вельховером предложены подходы к иридоглифическим исследованиям функционального статуса с точки зрения репаративных способностей и адаптационных возможностей человека [Вельховер, 1992].

Исследование цвета и структуры радужки в антропологии

В антропологических исследованиях при описании фенотипических особенностей пигментации кожи, волос и радужки одной из основных проблем является методическая сопоставимость результатов, полученных разными специалистами. Источниками этой проблемы могут быть либо несопоставимость применяемых методов, либо субъективные ошибки исследователей. В связи с этим в настоящее время весьма актуальным является применение инструментальных методов определения особенностей пигментации (вместо описательных шкал), а также унификация полученных материалов, которая может быть достигнута автоматической компьютерной обработкой первичных антропологических данных (например, изображений радужки) с помощью специального программного обеспечения.

В 2009 г. на базе сотрудничества Биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Научно-исследовательского и испытательного центра Биометрической техники МГТУ имени Н.Э. Баумана коллектив авторов [Дорофеева, Хрусталева, Крылов и др., 2010] разработал специальное программное обеспечение, позволяющее автоматически определять цвет глаз по шкале Бунака на основе фотографических изображений радужки. Авторами также предложена оригинальная компьютерная визуализация шкалы Бунака. Для разработки указанного программного обеспечения были использованы материалы комплексного антропологического обследования 578 студентов московского и калмыцкого университетов: 294 юноши и 284 девушки в возрасте от 16 до 24 лет. С помощью прибора «Иридоскоп И-5» в одинаковых условиях получены цифровые изображения радужки, составившие массив индивидуальных данных для изучения морфологических особенностей цвета глаз. Регистрация изображений радужки проводилась в условиях освещения галогенной лампой постоянной мощности с цветовой температурой 3350 К в отсутствие внешнего освещения. В качестве приемника излучения использовалась аналоговая видеокамера Panasonic WV-CP484 с высокостабильными характеристиками цветовой чувствительности. Разрешение полученных цифровых изображений радужки составило 1000 dpi. Параллельно с регистрацией цифровых изображений радужки проводилось визуальное оценивание цвета радужки по традиционной шкале Бунака, состоящей из 12 глазных протезов, сравнение с которыми позволяет отнести все цветовые оттенки к трем основным типам: темному (радужка не содержит никаких иных цве-

товых элементов кроме черного, бурого, желтого); смешанному (в радужке кроме элементов перечисленных цветов имеются также участки серого, голубого или зеленого в разном количестве) или светлому типу (вся радужка окрашена исключительно в серый, голубой или синий цвет, при этом элементы черного, бурого и желтого отсутствуют). Каждый из трех типов в свою очередь подразделяется на 4 класса, соответствующих шкале Бунака.

В результате проведенного исследования морфологических особенностей цвета глаз по традиционной шкале Бунака установлено, что цвет радужки определяется цветом автономного кольца, цилиарного и зрачкового поясов радужки. На следующем этапе была разработана методика автоматического определения цвета глаз. Классификация цвета глаз по шкале Бунака основана на визуальном восприятии цветового контраста, поэтому описание цвета радужки проводилось в координатах пространства признаков равноконтрастной цветовой модели $L^*a^*b^*$ [Джадд, Вышецки, 1978; Домасёв, Гнатюк, 2009; Хрусталева, Ермакова, Спиридонов, 2009]. Обучающая выборка состояла из 420 цифровых изображений. Для каждого класса построены распределения цветовых координат пикселей цифрового изображения в зонах автономного кольца, цилиарного и зрачкового поясов радужки и установлены их статистические характеристики. Цветовые координаты радужек разных цветов имеют различные статистические распределения, поэтому для автоматического определения радужки по цвету выбран непараметрический метод классификации k -ближайших соседей. Экспериментально установлено, что оптимальным с точки зрения устойчивости и точности метода классификации радужки по цвету является значение параметра $k=7$.

В результате анализа особенностей пигментации радужки и статистических свойств ее цифрового изображения разработано оригинальное программное обеспечение для измерения цвета и классификации радужки, нахождения «характерных» и «редких» представителей каждого класса и их компьютерной визуализации. Предложенное специальное программное обеспечение позволяет работать в трех режимах: обучения, классификации и визуализации. В режиме обучения оператор формирует обучающую выборку из цифровых изображений радужки, выделяет на них области автономного кольца, цилиарного и зрачкового поясов. Для распределений цветовых координат пикселей автоматически рассчитываются значения моды и граничные значения, которые сохраняются в текстовом файле. В режиме классификации, на основании результатов измерения цве-

товых координат пикселей исследуемого цифрового изображения, автоматически определяется классовая принадлежность радужки (рис. 1). В режиме визуализации программа выводит на экран изображения «характерных» и «редких» представителей каждого класса, установленных на основании обработки выборки изображений, сформированной в режиме обучения.

Разработанное специальное программное обеспечение было апробировано на независимой выборке, состоящей из 158 изображений радужек. Результаты апробации показали, что ошибки классификации I-го и II-го рода не превышают 15%. Для определения «характерных» представителей класса вычисляется мода распределения цветовых координат пикселей цифрового изображения радужки: L^* , a^* и b^* внутри класса. «Редкие» представители класса соответствуют экстремальным значениям распределения по каждой цветовой координате. Для проведения внутри- и межклассовых сравнений морфологических особенностей цвета радужки в различных популяциях объем и состав выборки представителей каждого класса могут быть изменены. Весьма существенным является универсальность разработанного программного обеспечения, поскольку при автоматическом определении особенностей цвета все изображения радужки оцениваются по единому

алгоритму, при этом нивелируется расхождение результатов и субъективный подход разных исследователей.

В заключение следует отметить, что ни одна из предложенных в научной литературе шкал для определения цвета глаз так и не стала универсальной, общепринятой, признанной и распространенной в широких кругах отечественных и зарубежных исследователей [Дорофеева, Лоскутова, Негашева, 2012]. Все предложенные шкалы в той или иной мере содержат ряд недостатков и не могут удовлетворить современного исследователя на новейшем этапе развития науки, интегрирующем знания морфологии, гистологии, современной генетики и биохимии и использующем компьютерные технологии. Некоторые из предложенных шкал непригодны для генетического анализа, другие – для статистической обработки; одни разработаны на немногочисленных моноэтнических группах и не прошли проверку на других популяциях, другие не учитывают влияние структурных особенностей радужки на формирование воспринимаемого цвета или базируются на устаревших данных. И, наконец, ни одна из шкал не прошла проверку классификации фенотипов цветов глаз методом анализа генетических маркеров. Некоторые шкалы давно оставлены (Беддо, Брока, Топинара, Бертильона и др.), наиболее обо-

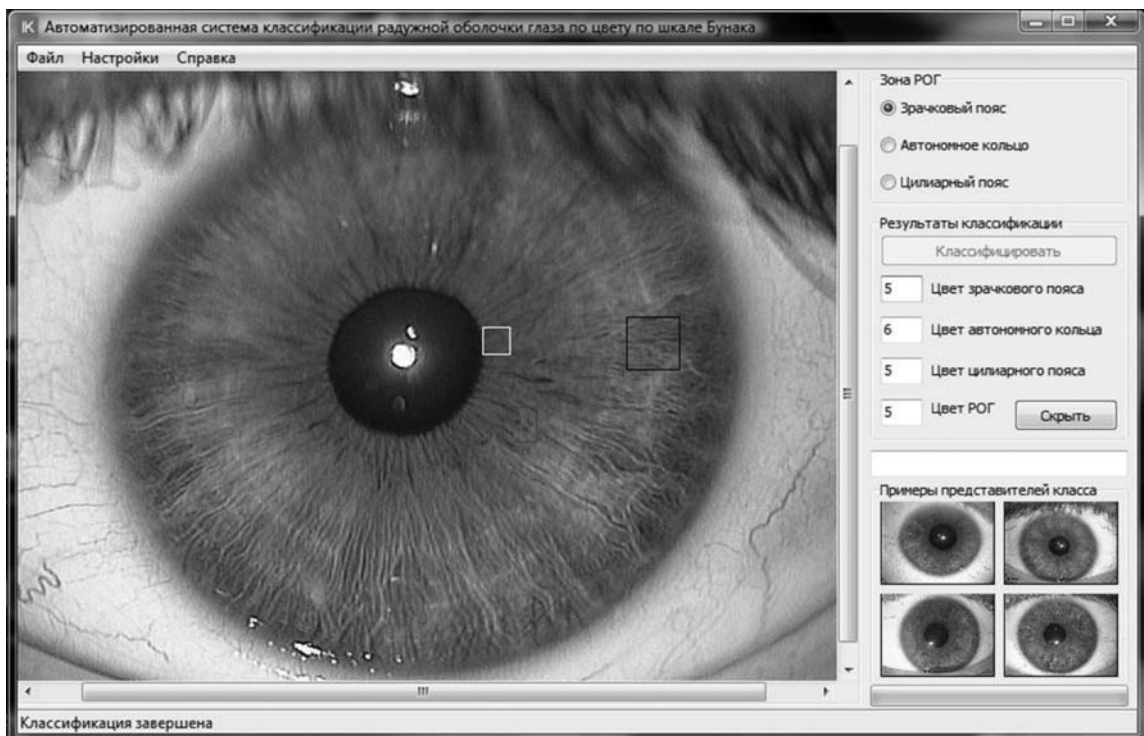


Рис. 1. Изображение окна специального программного обеспечения с результатами автоматической классификации радужки по цвету по шкале Бунака

снованные и удобные используются до настоящего времени (шкалы Мартина, Бунака). Распространенную и широко применяемую в России шкалу Бунака сам автор не признавал совершенной и, чтобы установить генетические границы 12 фенотипических классов, в качестве генетического анализа проводил сравнение состава потомков от однородных по цветовому классу близких сочетаний, например 10x10; 9x9 и так далее, до более удаленных. Если при таких сравнениях обнаруживалось, что границы изменчивости в распределении вариантов и средние величины одинаковы, делался вывод о том, что сравниваемые классы в среднем генетически однородны. По итогам этого анализа В.В. Бунак высказал несколько пожеланий о том, что можно попарно объединить № 12 и 11, 9 и 10, 8 и 7, 5 и 6 классы; 4, 2, 1 классы выделить как обособленные, а 3, видимо, требует дополнительного подразделения [Бунак, 1940]. Другие авторы предлагают объединить № 1 и 2, 6 и 7, 12 и 11 ввиду того, что первые из попарно перечисленных редко встречаются [Дубов, 1992]. Некоторые авторы, на основании многолетних полевых исследований, предлагают, наоборот, увеличить количество классов в шкале Бунака.

На современном этапе развития генетики, биохимии и молекулярной биологии известно, что цвет глаз наследуется полигенным кодоминантным путем [Frudakis, Thomas, Gaskin et al., 2003], что также предполагал В.В. Бунак [Бунак, 1940]. В настоящее время известны многие процессы белковой и нейрогуморальной регуляции меланогенеза, генов, кодирующих ключевые белки, а также химический состав и микроструктура различных меланинов и меланосом, особенности распределения пигментных клеток в тканях радужки [Millington, 2006; Sturm, Frudakis, 2004]. Таким образом, на данном этапе развития науки целесообразно провести комплексный молекулярно-генетический анализ фенотипов по цвету глаз для выяснения реальных генетических границ разных фенотипических классов. При этом определение особенностей цвета и структуры радужки необходимо проводить с помощью современных приборов, например, иридоскопа, позволяющего детально оценивать пигментные и структурные особенности радужки. Использование специального программного обеспечения для автоматической классификации цвета глаз [Дорофеева, Хрусталева, Крылов и др., 2010] по наиболее распространенной в отечественных антропологических исследованиях шкале Бунака позволит в определенной мере унифицировать фенотипический ряд цвета радужки. По результатам молекулярно-генетического исследования, проведение которого планируется при сотрудничестве биологического

факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и Медико-генетического Центра РАМН, возможно, удастся объективизировать шкалу Бунака с определением реальных границ различных фенотипов по цвету глаз.

Библиография

- Бунак В.В. Антропометрия. М.: УЧПЕДГИЗ, 1941.
 Бунак В.В. Генетический анализ окраски радужины человека // Уч. зап. МГУ. Сер. Антропология. 1940. Вып. 34. С. 193–208.
 Вельховер Е.С. Клиническая иридология. М.: Медицина, 1992.
 Вельховер Е.С., Ананин В.Ф. Введение в иридологию: Пуппилодиагностика. М.: Изд-во РУДН, 1991.
 Галиммулин Ф.З. Оценка конституциональных особенностей обследуемого с применением методики иридодиагностики // Иридолог: Сборник материалов всесоюзной ассоциации иридологов, 1990. № 2. С. 6–14.
 ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-6 Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 6. Данные изображения радужной оболочки глаза. М., 2006.
 Делоне Н.А., Солониченко В.Г. Адаптивные феномены человека в физиологии и медицине // Успехи физиологических наук 1999. Т. 30. № 2. С. 50–62.
 Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. Пер. с англ. под ред. Л.Ф. Артюшина. М.: Мир, 1978.
 Долотов Л.Е., Синичкин Ю.П., Коблова Е.В. и др. Оценка содержания пигмента меланина в радужной оболочке глаза человека путем анализа ее цветового изображения // Материалы 10 международной науч. школы по оптике, лазерной физике и биофизике «Проблема оптической физики». Саратов, 2007. С. 64–73.
 Домасёв М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб.: Питер, 2009.
 Дорофеева А.А., Лоскутова Ю.В., Негашева М.А. История развития методов изучения цвета глаз (ретроспектива шкал для определения пигментации и структуры радужки). // Вестник антропологии, 2012. № 2.
 Дорофеева А.А., Хрусталева А.В., Крылов Ю.В., Бочаров Д.А., Негашева М.А. Применение компьютерных технологий для изучения морфологических особенностей цвета радужной оболочки глаза в антропологии // Морфологияб 2010. № 2. С. 93–97.
 Дубов А.И. Антропоскопия: методический аспект // Материалы к серии «Народы и культуры». Новое в методике и методологии антропологических исследований. Антропологические исследования. М., 1992. Вып. X. Кн. 2. С. 44–73.
 Каган И.И., Канюков В.Н., Урбанский А.К. Закономерности внешнего строения и микротопографии радужки человека как основа микрохирургических вмешательств на переднем отделе глаза // Российская научная конф. с междунар. участием «Новое в экспериментально-морфологическом изучении глаза»: Тез. докл. / Вестн. Оренбург. гос. ун-та, 2005. Спец. вып. 166. С. 57–61,

- Коблова Е.В., Каменских Т.Г., Башкатов А.Н. и др.* Определение содержания меланина в радужной оболочке глаза человека в норме и при первичной открытоугольной глаукоме // Сб. тезисов по материалам 10-й научно-практической конференции «Актуальные проблемы офтальмологии». М., 2007. С. 59–61.
- Коблова Е.В., Сергеева Е.К., Башкатов А.И.* Исследование радиального распределения пигмента в радужной оболочке глаза методом пространственно-разрешенной отражательной спектроскопии // Материалы 65-й юбил. научн.-практ. конф. студентов и молодых специалистов СГМУ «Молодые ученые – здравоохранению региона». Саратов, 2004. С. 152.
- Копеева В.Г.* Глазные болезни. М.: Медицина, 2002.
- Кухарев Г.А.* Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека. СПб.: Политехника, 2001.
- Матвеев И., Ганькин К.* Распознавание человека по радужке // Гротек. Системы безопасности. 2004. № 5 (59). С. 72–76.
- Международная анатомическая терминология / Под ред. Л.Л. Колесникова. М.: Медицина, 2003.
- Рогинский Я.Я., Левин М.Г.* Основы антропологии. М.: Изд-во Мос. ун-та, 1955. 502 с.
- Сафина Р.Б.* Психофизиологический анализ иридологических маркеров индивидуальности. Дис. ... канд. психол. наук. Уфа, 2000.
- Скапцов А.А., Максимова И.Л.* Влияние монократного рассеяния на цветовые характеристики слоистых дисперсных систем применительно к модели радужной оболочки глаза // 2 Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине»: Тез. докл. / Альм. клин. мед., 2006. № 12. С. 32.
- Сомов Е.Е.* Клиническая анатомия органа зрения человека. М.: МЕДпресс-информ, 2005.
- Спирidonov И.Н.* Методы автоматизированной морфометрии медико-биологических изображений // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2003. № 1. С. 4–14.
- Урбанский А.К.* Микрохирургическая анатомия радужки // Клин. анатомия и эксперим. Хирургия, 2004. № 4. С. 151–159.
- Хацевич Т.Н.* Медицинские оптические приборы: Физиологическая оптика: Учебное пособие. Новосибирск: СГГА, 1998. Ч. 1.
- Хрисанфова Е.Н., Перевозчиков И.В.* Антропология. М.: Изд-во Мос. ун-та, Высшая школа, 2002.
- Хрусталеv А.В., Ермакова Т.А., Спирidonov И.Н.* Измерение цвета радужной оболочки глаза // Медико-технические технологии на страже здоровья: Сб. докладов XI РНТК. М.: НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 129–131.
- Хрусталеv А.В., Спирidonov И.Н.* Особенности изменения геометрических параметров радужной оболочки глаза // Биомед. технол. и радиоэлектрон., 2005. № 9. С. 17–21.
- Abhyankar A., Hornak L., Schuckers S.* Off-angle iris recognition using bi-orthogonal wavelet network system // Proc. of the 4rth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies (AutoID 2005). IEEE, 2005. P. 239–244.
- Byungjun S., Hyunsuk W., Gyundo K., Yillbyung L.* Discriminant iris feature and support vector machines for iris // Recognition Image Processing, 2004. ICIP apos'04. International Conf., 2004. Vol. 2. P. 865–868.
- Chohg S.C., Teoh A.B.J., Ngo D.C.L.* Tokenised discretisation in iris verification // IEICE Electronics Express., 2005. Vol. 2. N 11. P. 349–355.
- Cracknell K.P., Grierson I., Hogg P.* Morphometric effects of long-term exposure to latanoprost // Ophthalmol., 2008. Vol. 115. N 2. P. 418–420.
- Dorairaj V., Schmid N.A., Fahmy G.* Performance evaluation of non-ideal iris based recognition system implementing global ICA encoding // Proc. of the 2005 International Conf. on Image Processing. IEEE, 2005. Vol. 3. P. 285–288.
- Hyung G. L., Seungin N., Kwanghyuk B. et al.* Invariant biometric code extraction // ISPACS, 2004. P. 181–184.
- Frudakis T., Thomas M., Gaskin Z. et al.* Sequences associated with human iris pigmentation // Genetics, 2003. Vol. 165. P. 2071–2083.
- Ives R.W., Bonney B.L., Etter D.M.* Effect of image compression on iris recognition // IMTC 2005: Proc. of the IEEE, 2005. Vol. 3. P. 2054–2058.
- Ives R.W., Bonney B.L., Etter D.M., Du Y.* Iris pattern extraction using bit planes and standard deviations // Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on. Proc. of the IEEE, 2004. Vol. 1. P. 582–586.
- Krylov J.V., Khrustalev A.V., Spiridonov I.N.* Development of numerical methods of iris integral parameters assessment // Proc. of the 4th Russian-Bavarian Conference on Biomedical Engineering. Moscow: MIET, 2008. P. 76–79.
- Millington G.W.* Proopiomelanocortin (POMC): the cutaneous roles of its melanocortin products and receptors // Clin. Exp. Dermatol., 2006. Vol. 31. N 3. P. 407–412.
- Otaka I., Kumagai K., Inagaki Y. et al.* Simple and inexpensive software designed for the evaluation of color // Amer. J. Ophthalmol., 2002. Vol. 133. N 1. P. 140–142.
- Pappas R.M., Pusin S., Higginbotham E.J.* Evidence of early change in iris color with latanoprost use // Arch. Ophthalmol., 1998. Vol. 116. N 8. P. 1115–1116.
- Sturm R. A., Frudakis T.N.* Eye color: portals into pigmentation genes and ancestry // Trends in genetics, 2004. N 8. P. 327–332.
- Xiaoyan Y., Pengfei S.* Efficient iris recognition system based on iris anatomical structure // IEICE Electronics Express., 2007. Vol. 4. N 17. P. 555–560.
- Yong W., Jiu-Qiang H.* Iris recognition using independent component analysis // Proc. of the 4rth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. IEEE, 2005. P. 4487–4482.

Контактная информация:

Дорофеева Анна Алексеевна. E-mail: ankada@mail.ru;
Лоскутова Юлия Вячеславовна. E-mail: ulabox86@mail.ru;
Крылов Юрий Викторович. E-mail: krylov-yuri@yandex.ru;
Хрусталеv Андрей Владимирович. E-mail: d1821@yandex.ru;
Негашева Марина Анатольевна. E-mail: negasheva@mail.ru.

MODERN METHODS OF STUDYING THE COLOR AND TEXTURE OF IRIS IN VARIOUS SCIENCES AND THEIR PERSPECTIVES IN ANTHROPOLOGY

A.A. Dorofeeva¹, Yu.V. Loskutova¹, A.V. Khrustalev², Yu.V. Krilov², M.A. Negasheva¹

¹ Department of Anthropology, Biological faculty, Lomonosov' State University, Moscow

² Department «Biomedical technical systems» of the Bauman' State Technical University, Moscow

This article describes iris structure and color as they are presented in scientific literature.

The first part of the paper is devoted to iris color and structure as unique biometric characteristics for human identity. Special emphasis is made to the main anatomical and morphological properties of the iris, which defines the requirements for recognition patterns. We present the scheme used in advanced methods of automatic iris recognition by its images.

The second part of the article describes pigmentation and iris structure in medicine. On the bases of scientific publications, we fix important correlations between the amount of pigment with eye diseases, research methods and measurement of melanin.

In the third part of the paper we offer modern developments in methodological approach to eye color research, using computer technology. We proposed a unified approach, based on the requirements of an objective assessment of the phenotypic characteristics of the iris pigmentation, when one of the main problems is methodological comparability of the results, obtained by different specialists. The sources of this problem can be either a lack of comparability of used methods, or subjective mistakes of researchers. In this context, the application of instrumental methods for determining of features pigmentation (instead of scales) is very important, as well as the unification of the obtained materials, which can be achieved by automatic computer processing of primary anthropological data (such as iris images), using special software.

This article presents the results of the author's innovative software designed specially for the automatic detection of eye color according to 12-class Bunak's anthropological scale based on digital photographs of iris obtained with device – iridoskop. On the basis of digital photos and proposed software that are the result of cooperation of the Biological Faculty of Moscow State University and Research and Testing Center of biometric technology of the Bauman Moscow State Technical University, visualization of a 12-class Bunak scale as computer images was made possible.

The developed software can be very actual and important to demonstrate the museum ethnographic exhibitions at the new high-quality level of computer technologies, for educational purposes, illustration of iris pigmentation variants in different human populations.

In conclusion, we consider the perspectives of the study of iris color and structure in anthropological research with the possibility of new computer technologies and ways to improve of existing methods of determination of eye color based on molecular genetic studies.

Keywords: *anthropology, methods for the determination of eye color, methods of studying the structure of the iris and computer technology to study the characteristics of the iris*