

А.А. Дорофеева¹, А.В. Хрусталева², Ю.В. Крылов², Д.А. Бочаров² и М.А. Негашева¹

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЦВЕТА РАДУЖКИ В АНТРОПОЛОГИИ

¹Кафедра антропологии (зав. — проф. В.П. Чтецов) биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; ²кафедра «Биомедицинские технические системы» (зав. — проф. И.Н. Спиридонов) Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, e-mail: negasheva@mail.ru

При проведении антропологического обследования 578 студентов в возрасте от 16 до 24 лет получены цифровые данные радужки (Р) для изучения особенностей ее цвета. Одновременно с регистрацией цифровых изображений проведено визуальное оценивание цвета Р по традиционной шкале Бунака, состоящей из 12 глазных протезов. Разработано оригинальное программное обеспечение для автоматического определения цвета Р по 12 классам шкалы Бунака и создана компьютерная версия данной шкалы. Предложенное программное обеспечение позволяет проводить определение цвета Р с высокой достоверностью на основе численных оценок, при этом субъективизм и методическое расхождение разных исследователей нивелируются. Разработанное авторами программное обеспечение для автоматизированного определения цвета Р имеет большое значение для развития теоретической и прикладной антропологии и может быть использовано в медицине катастроф, спортивной медицине, медико-генетическом консультировании и профотборе.

Ключевые слова: радужка, цвет глаз, компьютерный анализ, антропология.

Радужка (Р) человека имеет сложную морфологическую пятислойную структуру. Цвет Р обусловлен концентрацией и пространственным распределением пигментных клеток: меланоцитов, ксантофоров, гуанофоров [4] и количеством пигмента: меланина, феомеланина и др. [14] в переднем пограничном слое.

Цвет Р на протяжении многих лет использовался антропологами и этнографами для характеристики популяций [2, 13], офтальмологами и фармакологами при различных нарушениях функций органа зрения [19], хирургами в пластической хирургии и протезировании [17], иридологами и рефлексологами для оценки функционального состояния человека [4, 11]. Цвет Р также исследовали как индивидуальную характеристику в аспектах полового диморфизма [1, 2], изменчивости в процессе онтогенеза [16], антропоэстетики [12] и реализации генетической информации относительно цвета Р [20]. Современное состояние исследований Р в антропологии и других областях знания подробно представлено в обзорной статье А.А. Дорофеевой и М.А. Негашевой [7].

В антропологии интерес к пигментации Р нарастал с конца XIX – начала XX вв. Так, Поль Брока в 1877 г. составил таблицы определения цвета Р. Рудольф Мартин дополнил и улучшил методику Брока, предложив шкалу цвета Р, состоящую из 16 классов. Позднее Шульце и Заллер модифицировали шкалу Мартина, расширив цветовой спектр Р до 40 вариантов пигментации [3]. В отечественной антропологии чаще всего

используют описательную шкалу В.В. Бунака [3], учитывающую 3 основных типа пигментации Р, каждый из которых подразделяется на 4 класса. До настоящего времени не разработан инструментальный метод для определения цвета Р, позволяющий получать объективную оценку пигментации радужки. Поэтому зачастую важные результаты антропологических исследований оказываются несопоставимыми.

Вопрос о вариации пигментации Р человека возникает в общей биологии, антропологии, этнографии, а также в процессе преподавания этих дисциплин. К сожалению, физической модели шкалы В.В. Бунака для определения цвета Р в свободном доступе нет ни в вузах, ни тем более в школах [8], что затрудняет изложение материала и искажает представление обучающихся о цветовых особенностях Р у представителей различных расовых и этнических групп.

Проблема высокотехнологичной визуализации различных оттенков цвета Р стала весьма актуальной в исторических и этнографических музеях для компьютерных экспозиций облика как древнего населения, так и огромного разнообразия современных популяций, населяющих различные регионы. Для восстановления уникальных историко-этнографических материалов, накопленных многочисленными отечественными и зарубежными исследователями по полиморфизму цвета Р у представителей тысяч популяций, охватывающих большую часть антропологических типов ойкумены, следует преобразовать 12-клас-

совую шкалу Буака в цифровые изображения. Для научных, прикладных и учебных задач необходимо обеспечить компьютерную визуализацию как «характерных», так и «редких» представителей каждого класса.

В связи с описанной проблематикой целью данного исследования была разработка оригинального программного обеспечения для автоматического определения цвета Р по 12 классам шкалы Буака и компьютерная визуализация данной шкалы.

Для достижения поставленной цели 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 Р, составившие массив индивидуальных данных для изучения морфологических особенностей цвета Р.

Регистрацию изображений Р проводили в условиях освещения галогенной лампой постоянной мощности с цветовой температурой 3350 К в отсутствие внешнего освещения. В качестве приемника излучения использовали аналоговую видеокамеру Panasonic WV-CP484 (Япония) с высокостабильными характеристиками цветовой чувствительности. Разрешение полученных цифровых изображений Р составило 1000 dpi.

Параллельно с регистрацией цифровых изображений Р проводили визуальную оценку цвета Р по традиционной шкале Буака, состоящей из 12 глазных протезов, сравнение с которыми позволяет отнести все цветовые оттенки к трем основным типам: темному (Р не содержит никаких иных цветовых элементов кроме черного, бурого, желтого); смешанному (в Р, кроме элементов перечисленных цветов, имеются также участки серого, голубого или зеленого в разном количестве) или светлому типу (вся Р 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: 1-й — черный — Р неотделима по цвету от зрачка; 2-й — темнокарий — Р светлее зрачка, но окрашена равномерно; 3-й — светло-карий — характерна неоднородная окраска Р на всех ее участках; 4-й — желтый — окраска равномерная, без рисунка, иногда довольно светлая; 5-й — имеет буро-зеленый или буро-серый оттенок, обычно зелено-серый цвет занимает периферию и выступает как бы фоном, иногда наблюдается радиальная или концентрическая полосчатость; 6-й — зеленый — самые различные хроматические элементы смешиваются приблизительно в равном количестве и располагаются беспорядочно; 7-й — серо-зеленый — отли-

чается от предыдущего наличием значительных участков серого цвета и, вместе с тем, участков самой различной окраски и неопределенного расположения; 8-й — серый с желтым венчиком — элементы желтой или бурой окраски расположены вокруг зрачка, большая часть Р сохраняет чистый серый цвет; 9-й — серый — обычно с рисунком в виде радиальных полос более темной окраски; 10-й — серо-голубой (обычно с рисунком из полос); 11-й — голубой; 12-й — синий [3].

В результате проведенного исследования особенностей цвета Р по традиционной шкале Буака установлено, что он определяется цветом автономного кольца, цилиарного и зрачкового поясов Р. На следующем этапе разработана методика автоматического определения цвета Р. Классификация цвета Р по шкале Буака основана на визуальном восприятии цветового контраста, поэтому описание цвета Р проводили в координатах пространства признаков равноконтрастной цветовой модели $L^*a^*b^*$ [5, 6, 15].

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 Р (рис. 1) и установлены их статистические характеристики.

Цветовые координаты Р разных цветов имеют различные статистические распределения, поэтому для автоматического определения Р по цвету выбран непараметрический метод классификации k-ближайших соседей. Экспериментально установлено, что оптимальным, с точки зрения устойчивости и точности метода классификации Р по цвету, является значение параметра $k=7$.

В результате анализа особенностей пигментации Р и статистических свойств цифрового изображения Р разработано специальное программное обеспечение (СПО) для измерения цвета и классификации Р, нахождения «характерных» и «редких» представителей каждого класса и их компьютерной визуализации.

В антропологических исследованиях при описании фенотипических особенностей пигментации кожи, волос и Р 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

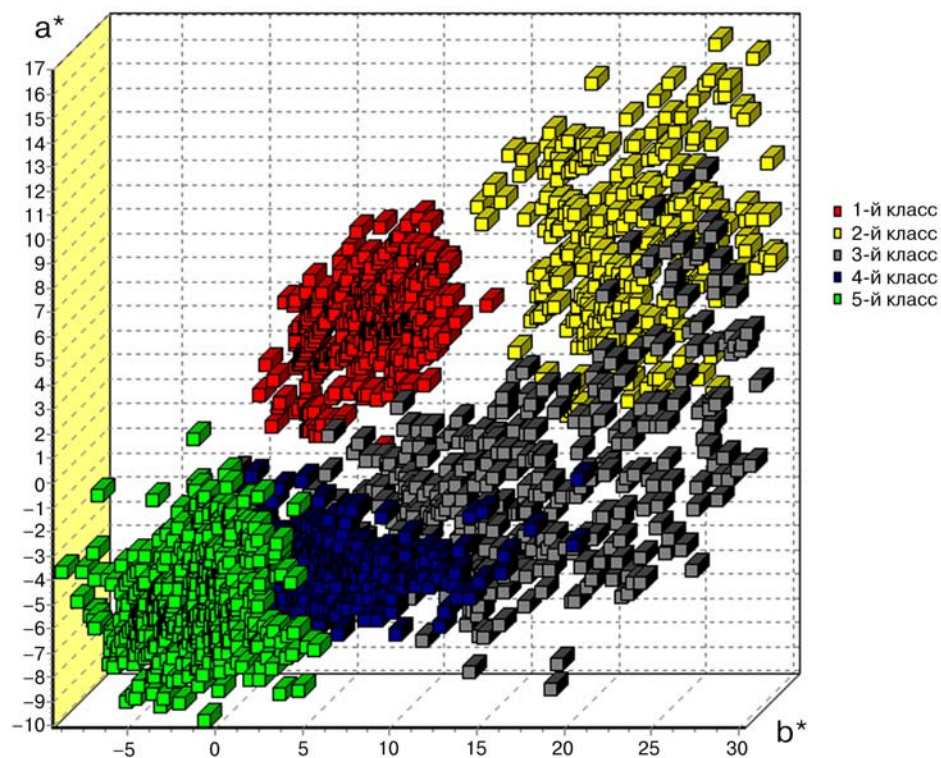


Рис. 1. Распределения цветовых координат автономного кольца a^* и b^* для 1-, 3-, 6-, 9-го и 11-го классов цвета радужки по шкале Бунака.

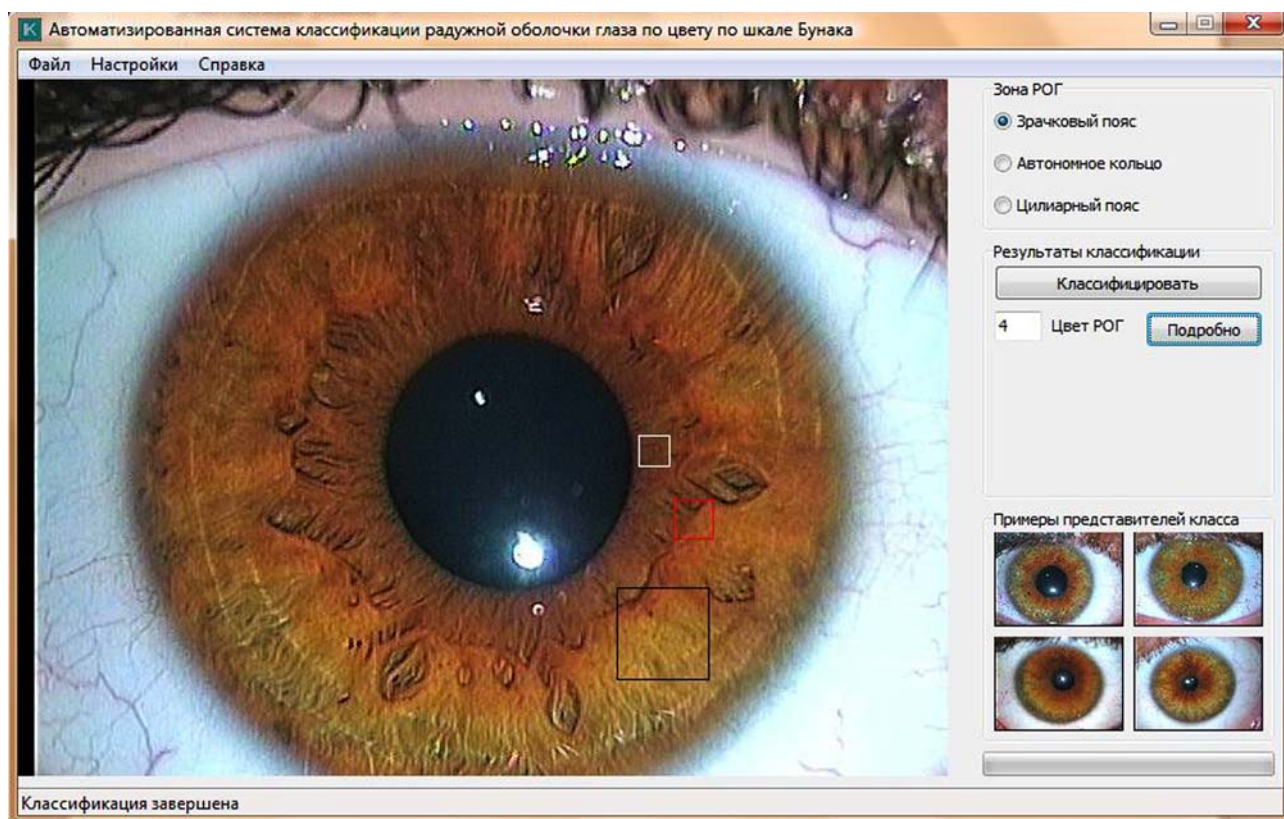


Рис. 2. Изображение окна специального программного обеспечения с результатами автоматической классификации цвета радужки (Р) по шкале Бунака.

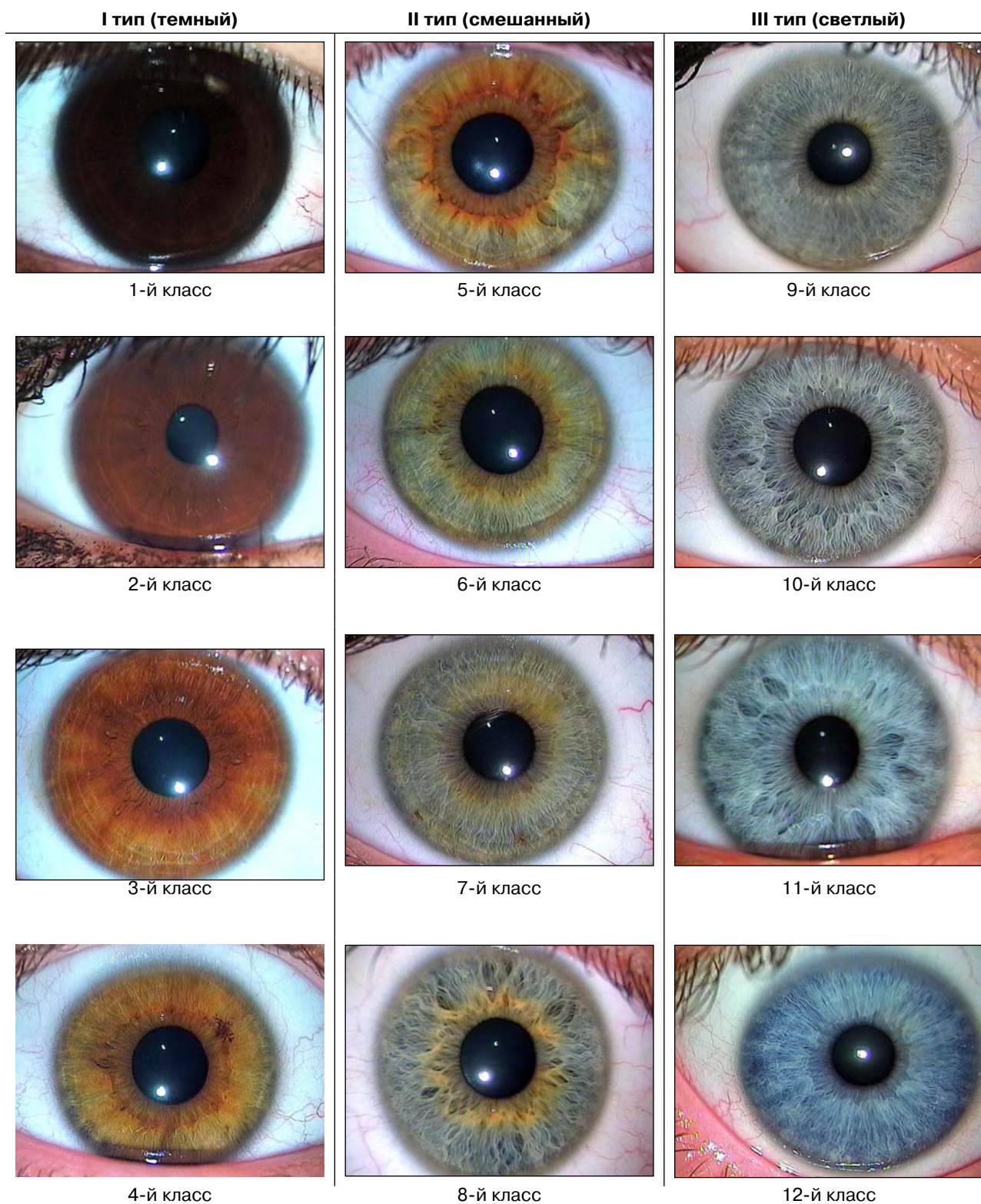


Рис. 3. Результаты компьютерной визуализации шкалы Бунака.

Классы: 1-й — черный, зрачок почти неотличим по цвету от радужки (Р); 2-й — темно-карий, Р светлее зрачка, но равномерно окрашена; 3-й — светло-карий, Р в разных участках окрашена неравномерно; 4-й — желтый, равномерно окрашенная Р без рисунка; 5-й — буро-желто-зеленый, зелено-серый занимает периферию и выступает фоном, иногда радиальная или концентрическая полосчатость; 6-й — зеленый, различные хроматические элементы смешаны в равном количестве и беспорядочно; 7-й — серо-зеленый, в беспорядочной буро-зелено-серой гамме преобладает серый; 8-й — серый или голубой с буро-желтым венчиком; 9-й — серый, различные оттенки серого, обычно с рисунком в виде более темных радиальных полос; 10-й — серо-голубой, хорошо выражен рисунок в виде темных или светлых серых полос; 11-й — голубой, чистый или с рисунком в виде тонких полос, основной фон голубой; 12-й — синий, основной фон синий, чистый или с рисунком из тонких полос.

Вероятности классификации радужки (Р) по цвету

Результат классификации цвета Р по шкале Бунака	Класс цвета Р	Класс цвета Р по шкале Бунака											
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	11-й	12-й
	1-й	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-й	0	100	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-й	0	0	95	10	0	0	0	0	0	0	0	0
	4-й	0	0	0	90	5	0	0	0	0	0	0	0
	5-й	0	0	0	0	80	5	0	0	0	0	0	0
	6-й	0	0	0	0	15	80	0	0	0	0	0	0
	7-й	0	0	0	0	0	0	90	0	5	0	0	0
	8-й	0	0	0	0	0	15	0	90	5	5	0	0
	9-й	0	0	0	0	0	0	5	0	75	0	0	0
	10-й	0	0	0	0	0	0	5	10	10	85	10	0
	11-й	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	90	0
	12-й	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

■ — верная классификация (%).

■ — ошибочная классификация (%).

первичных антропологических данных (например изображений Р) с помощью СПО.

Разработанное авторами СПО для автоматического определения цвета глаз по 12-классовой шкале Бунака, а также компьютерная визуализация данной шкалы являются оригинальными и в отечественной научной литературе приводятся впервые. Отсутствие зарубежных аналогов объясняется применением других описательных шкал, например Мартина, которые до настоящего времени не имеют своих компьютерных визуализаций. В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработано СПО для определения 4 основных типов пигментации Р [18]. Аналогичные исследования по применению компьютерных технологий для определения особенностей цвета зубов и волос проводятся рядом других авторов [9, 10].

Предложенное в нашем исследовании СПО для автоматического определения цвета Р по 12-классовой шкале Бунака позволяет работать в трех режимах: обучения, классификации и визуализации. В *режиме обучения* оператор формирует обучающую выборку из цифровых изображений Р, выделяет на них области автономного кольца, цилиарного и зрачкового поясов. Для распределений цветовых координат пикселей автоматически рассчитываются значение моды и граничные значения, которые сохраняются в текстовом файле. В *режиме классификации* на основании результатов измерения цветовых координат пикселей исследуемого цифрового изображения автоматически определяется классовая принадлежность Р (рис. 2). В *режиме визуализации* программа выводит на экран изображения «характерных» и «редких» представителей каждого класса, уста-

новленных на основании обработки выборки изображений, сформированной в режиме обучения.

Разработанное СПО было апробировано на независимой выборке, состоящей из 158 изображений Р. Результаты апробации показали, что ошибки классификации 1-го и 2-го рода не превышают 15%. В таблице представлены вероятности классификации Р по цвету.

Для определения «характерных» представителей класса вычисляется мода распределения цветовых координат пикселей цифрового изображения Р: 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 Р в различных популяциях объем и состав выборки представителей каждого класса могут быть изменены.

На рис. 3 представлены наиболее «характерные» варианты для 12 классов шкалы Бунака, полученные в результате компьютерной визуализации на основе цифровых изображений Р 578 человек. Данный рисунок, таким образом, является компьютерной версией традиционной шкалы Бунака.

Внедрение методики автоматического определения цвета Р в антропологические исследования позволит значительно улучшить и ускорить сбор материала в экспедиционных условиях, так как позволяет проводить определение цвета Р с высоким уровнем значимости на основе численных оценок. При индивидуальном обследовании достаточно получить изображения Р, а их обработку можно проводить после завершения экспедиции. Весьма существенным является универсальность

разработанного СПО, поскольку при автоматическом определении особенностей цвета все изображения Р оцениваются по единому алгоритму, при этом нивелируется расхождение результатов и субъективизм разных исследователей.

Объективизация традиционной шкалы Бунака и создание программного обеспечения для автоматического определения цвета Р имеют не только большое значение для развития теоретической и прикладной антропологии, но могут оказаться весьма актуальными и востребованными для демонстрации музейных этнографических экспозиций на новом уровне компьютерных технологий; для учебно-методических целей, поскольку в процессе преподавания общей биологии, антропологии, этнографии и других дисциплин возникает вопрос о вариантах пигментации Р человека; а также для решения других прикладных задач. Программное обеспечение автоматического определения цвета Р может быть использовано в медицине катастроф, спортивной медицине, медико-генетическом консультировании, при проведении профессионального отбора для оценки функционального статуса и адаптационных возможностей человека.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009–2013 гг.

ЛИТЕРАТУРА

- Аксенова Г.А. Статистические соотношения в межгрупповой изменчивости черт внешности женских и мужских выборок евразийского населения. В кн.: Женщина в аспекте физической антропологии. М., Институт этнологии и антропологии РАН, 1994, с. 75–86.
- Антропозология центральной Азии. М., Научный мир, 2005.
- Бунак В.В. Антропометрия. М., Учпедгиз Наркомпроса РСФСР, 1941.
- Вельховер Е.С. и Ананин В.Ф. Иридология (теория и методы). М., РУДН и Биомединформ, 1992.
- Джадд Д. и Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М., Мир, 1978.
- Домасёв М.В. и Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб., Питер, 2009.
- Дорофеева А.А. и Негашева М.А. Современное состояние исследований радужной оболочки глаза в антропологии. Вестн. МГУ, Серия XXIII. Антропология, 2010, № 1, с. 5–24.
- Липатов П.И. и Липатова Л.Н. Основы антропологии с элементами генетики человека. Биология, 2003, № 43, с. 28–31.
- Максимовская Л.М., Кудрин К.Г. и Кузьменко В.В. Лабораторные исследования цветовых координат различных шкал и композитных материалов для оптимизации определения цвета зубов. В кн.: Сборник трудов Всероссийского научно-практического форума «Дентал-Ревю-2010». М., НИМСИ МГМСУ, 2010, с. 151–153.
- Павлов С.А., Шевченко И.Н., Павлова Л.В. и Путина Н.В. Изучение меланина человеческого волоса. Спектральные, парамагнитные, оптические свойства и фотохимические реакции. Успехи химии и химической технологии, 2000, ч. 6, вып. 14, с. 56–58.
- Спиридонов И.Н. Медицинские и социальные аспекты дерматоглифической и иридокопической диагностики. Сознание и физическая реальность, 1999, т. 4, № 1, с. 47–57.
- Халдеева Н.И. Антропозстетика. Опыт антропологических исследований. М., Институт этнологии и антропологии РАН, 2004.
- Хеапост Л. Изменчивость цвета глаз и волос у финно-угорских народов. В кн.: Актуальные направления антропологии. Сборник, посвящ. юбилею акад. РАН Т.И. Алексеевой. М., изд. Ин-та археол., 2008, с. 222–227.
- Хрисанфова Е.Н. и Перевозчиков И.В. Антропология. М., Изд-во Московск. ун-та, 2005.
- Хрусталева А.В., Ермакова Т.А. и Спиридонов И.Н. Измерение цвета радужной оболочки глаза. В кн.: Медико-технические технологии на страже здоровья: Сб. докладов XI РНТК. М., НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, с. 129–131.
- Ченцова О. и Ченцова Е. Старение и глаза. М., Медицина, 2004.
- Groves N. Diaphragm implant safety changes color of iris. Ophthalmol. Times. 2005, v. 15, p. 72.
- Krylov J.V., Khrustalev A.V. and Spiridonov I.N. Development of numerical methods of iris integral parameters assessment. In: Proceedings of the 4th Russian-Bavarian Conf. Biomed. Engineering. Moscow, MIET, 2008, p. 76–79.
- Morrison D.A., FitzPatrick D.R. and Fleck B.W. Iris coloboma with iris heterochromia: a common association. Arch. Ophthalmol., 2000, v. 118, № 11, p. 1590–1591.
- Sturm R.A. A golden age of human pigmentation genetics. Trends Genetics, 2006. v. 22, № 9, p. 464–468.

Поступила в редакцию 29.01.10

Получена после доработки 05.02.10

APPLICATION OF COMPUTER TECHNOLOGIES FOR THE STUDY THE MORPHOLOGICAL PECULIARITIES OF THE IRIS COLOR IN ANTHROPOLOGY

A.A. Dorofeyeva, A.V. Khrustalev, Yu.V. Krylov, D.A. Bocharov, M.A. Negasheva

Digital images of the iris were received for study peculiarities of the iris color during the anthropological examination of 578 students aged 16–24 years. Simultaneously with the registration of the digital images, the visual assessment of the eye color was carried out using the traditional scale of Bunak, based on 12 ocular prostheses. Original software for automatic determination of the iris color based on 12 classes scale of Bunak was designed, and computer version of that scale was developed. The software proposed allows to conduct the determination of the iris color with high validity based on numerical evaluation; its application may reduce the bias due to subjective assessment and methodological divergences of the different researchers. The software designed for automatic determination of the iris color may help develop both theoretical and applied anthropology, it may be used in forensic and emergency medicine, sports medicine, medico-genetic counseling and professional selection.

Key words: *iris, eye color, computer analysis, anthropology.*

Department of Anthropology, Biological Faculty, M.V. Lomonosov Moscow State University;

Department of Biomedical Technical Systems, N.E. Bauman Moscow State Technical University