

Г. И. Желтов

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПО РАДУЖКЕ: ПРОБЛЕМЫ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ

Применительно к задачам биометрической идентификации личности по радужке глаза рассмотрен комплекс технических требований к оптико-электронным системам фоторегистрации (сканерам) радужки в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра с высоким пространственным разрешением. Требования сформулированы адекватно анатомическим и физиологическим свойствам зрительной системы человека. Представлен экспериментальный образец сканера, обеспечивающий получение ИК-изображений радужки глаза с пространственным разрешением не менее 50 лин./мм.

E-mail: zheltov@dragon.bas-net.by

Ключевые слова: биометрия, идентификация личности, радужка, сканер, инфракрасный (ИК) диапазон спектра

Введение. В общей структуре мирового биометрического рынка технология идентификации личности по радужной оболочке глаз (радужке) (Iris Recognition Technology – IRT, IR-технология) занимает особое место. По данным International Biometric Group (IBG), доля таких технологий составляет примерно 8...9 %. Однако по разнообразию сфер применения IR-технология является безусловным лидером. Идентификация по радужке глаза широко используется в системах паспортно-визового контроля крупнейших аэропортов мира; при контроле допуска в государственные учреждения ряда европейских стран и США; при контроле допуска в учреждения с высокой степенью секретности (оборонные предприятия, в частности на заводы по производству ядерного вооружения); в банковской сфере и т. д.

Значительное внимание уделяют IR-технологии военные ведомства европейских стран и США. В качестве примера можно привести уникальный крупнобюджетный (437 млн долл.) проект Human Identification at a Distance Управления перспективных исследований министерства обороны США, в рамках которого для военных целей предусмотрено создание мультибиометрической системы скрытного распознавания человека на большом расстоянии (до 150 м). Система включает в себя дистанционное сканирование радужки глаза.

Кроме многократно отмеченных достоинств IR-технологии (дистанционность, скрытность, оперативность), рекордным показателем является высокая надежность идентификации личности или, другими словами, малая вероятность ошибки [1, 2].

В 2009 г. компания IrisGuard Incorporated провела испытания камеры IG-AD100 для сканирования радужки глаза с программой кодирования изображений глаз пользователя [3]. С учетом объема базы изображений радужки, использованной IBG при испытаниях, можно утверждать, что камера IG-AD100 обеспечивает значение EER не более 10^{-4} (Equal Error Rate – EER, вероятность ошибки идентификации при настройке камеры на равную вероятность ошибок 1-го (не распознавание подлинного лица) и 2-го (ложное распознавание «самозванца») рода) [3]. В настоящее время это наилучший показатель, зарегистрированный для всех разновидностей систем биометрической идентификации личности.

Концепция IR-технологии была запатентована в 1987 г. офтальмологами Л. Фломом и А. Сафиром. По их просьбе математик Дж. Даугман разработал математическую теорию (1990) и запатентовал практический метод кодирования структур радужки (1994) [4, 5]. Владельцами патентов и основными поставщиками техники для реализации IR-технологии на мировом рынке являются фирмы Panasonic и Iridian Technologies. Срок действия патента, относящегося к основной концепции, истек в 2005 г. В 2011 г. потерял силу и патент 1994 г., что существенно активизировало разработку методов и средств реализации IR-технологии в ближайшем будущем.

Мотивацией к созданию отечественных приборов и методов для реализации IR-технологии являются не только коммерческие соображения. Большое значение имеет требование к обеспечению надежной защиты информации и систем управления базами биометрических данных от постороннего доступа. При использовании импортного оборудования, поставляемого в комплекте с программным обеспечением, соответствующая безопасность не гарантируется.

Разработка систем идентификации по радужке глаза объединяет три направления. Первое направление – создание аппаратуры для фоторегистрации радужки глаза (сканера); второе – разработка программного обеспечения (комплекс программ идентификации, КПИ) для первичной обработки изображения радужки, ее кодирования и идентификации; третье – формирование базы изображений радужек глаза в объеме, достаточном как для разработки КПИ, так и для корректной оценки надежности создаваемой системы в целом.

В рамках первого направления сформулируем технические требования к сканеру радужки глаза, ориентированному на возможно полное выявление деталей ее анатомической структуры. Подобный сканер обеспечит создание универсальной базы высококачественных изображений радужки глаза. Такая база может быть применена для разработки и (или) аттестации ИРТ-систем, использующих изображения как с высоким, так и с низким пространственным разрешением.

Разрешающая способность. Радужка (рис. 1) имеет вид тонкой, почти округлой пластинки. Для среднестатистического (нормально-го) глаза ее горизонтальный диаметр составляет 12,5 мм, вертикальный – 12 мм [6]. Наружный и внутренние слои радужки содержат пигмент меланин, локализованный в гранулах. Строма представляет собой комплекс коллагеновых волокон, ориентированных преимущественно радиально, вдоль сосудистого русла.

Рельеф радужки, образуемый сетью сосудов и нервов, а также стромальными и мышечными волокнами, уникален для каждого человека. Он формируется примерно к концу первого года после рождения и остается неизменным до конца жизни.

Центральное отверстие радужки – зрачок глаза играет роль диафрагмы, регулирующей световой поток на сетчатке. В зависимости от освещенности фона диаметр зрачка может изменяться от 1 до 8 мм. При этом радиальные элементы структуры деформируются («сморщиваются»).

Для выбора параметров регистрирующей системы, существенно, что основная масса кровеносных сосудов (венул и артериол), формирующих радиальную структуру рельефа радужки, имеет диаметр, характерный для кровеносной системы человека в целом: 35...50 мкм [6]. Такой же минимальный диаметр характерен для разветвлений нервных и стромальных волокон.

Для выделения рельефа с указанными размерами неоднородностей регистрирующая система – объектив плюс матрица фотоприемника – должна обеспечивать разрешающую способность, отнесенную к плоскости предмета, не менее 50 лин./мм, или пространственную частоту – $5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$. Этот параметр определяет допустимую степень дискретизации изображения в плоскости матрицы фотоприемника. Изображение радужки глаза, соответствующее значению указанной разрешающей способности, должно иметь диаметр не менее 600 пиксель при условии, что значение собственной разрешающей способности объектива превышает приведенное выше значение пространственной частоты.

Структурные элементы радужки, переплетаясь, формируют сложный узор, включающий в себя как мелкомасштабные элементы, так и более крупные фрагменты, адекватные существенно более низкой пространственной частоте (примерно до 10^3 м^{-1}). Это обуславливает еще одно достоинство радужки, как биометрического идентификатора. Информация об индивидуальных особенностях строения радужки может быть получена при ее сканировании как с малого расстояния (высокое пространственное разрешение), так и с относительно большого расстояния (низкое пространственное разрешение). В последнем случае вероятность ошибки возрастает, однако индиви-

дуальные признаки, используемые для идентификации личности, остаются.

Спектральный диапазон. Изображение радужки глаза со слабой и средней пигментацией успешно регистрируется при экспонировании в видимом диапазоне спектра. Тогда фоновым излучением является диффузное излучение, отраженное от задней поверхности радужки и рассеянное на неоднородностях ее структуры. На этом фоне различимы неоднородности рельефа и структура кровеносной системы с выраженными спектральными полосами поглощения, соответствующими гемоглобину крови.

Как уже было отмечено, если глаз характеризуется достаточно сильной пигментацией, то наружный слой радужки (см. рис. 1) содержит большое количество микрогранул на основе меланина. Максимальное значение спектрального коэффициента поглощения меланина составляет 335 нм и плавно уменьшается по мере увеличения длины волны излучения [7]. В ближней инфракрасной (ИК) области спектра для излучения с длинами волн свыше 700...720 нм значение этого коэффициента становится пренебрежимо малым. Таким образом, меланин практически полностью поглощает свет видимого диапазона спектра. Для внешнего наблюдателя цвет пигментированной радужки воспринимается как коричневый (от карего до темно-карего). Интенсивность видимого излучения, диффузно отраженного структурными элементами радужки, резко уменьшается. Детали рельефа становятся практически неразличимыми.

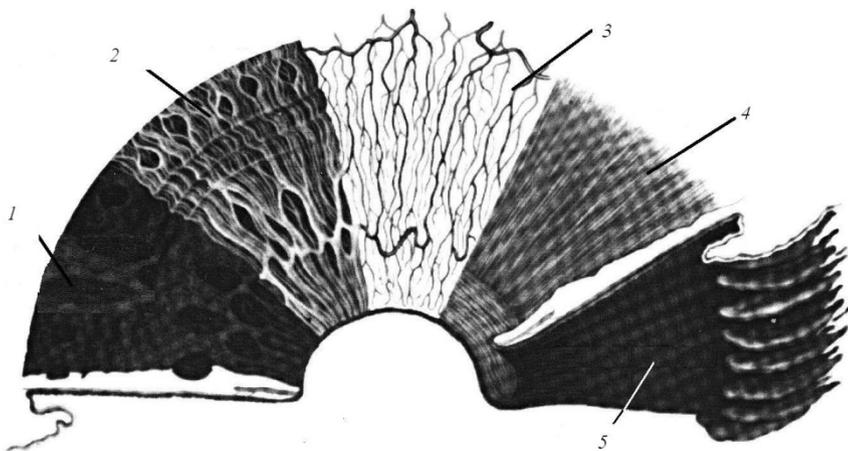


Рис. 1. Анатомическая структура радужки глаза [6]:

1 – коричневая радужка; 2 – голубая радужка; 3 – сосуды; 4 – мышцы; 5 – задняя поверхность

Выраженная пигментация радужки характерна для более 2/3 населения Земли. В связи с этим (в частности, цветное изображение ра-

дужки может нести информацию о некоторых заболеваниях человека) в подавляющем числе существующих систем биометрической идентификации по радужке глаза используется для экспонирования и фоторегистрации излучение ближнего ИК-диапазона спектра.

Потеря информации о цвете радужки существенно снижает контраст ее изображения. С позиций волновой оптики радужка в ИК-диапазоне спектра представляет собой среду, состоящую из «мягких» рассеивающих структурных элементов. Другими словами, это оптически прозрачные неоднородности, показатель преломления которых незначительно отличается от показателя преломления среды. Характерный размер таких структурных элементов много больше длины волны ИК-излучения.

Контраст изображения, формируемого за счет обратного рассеяния ИК-излучения, в первом приближении определяется отношением интенсивности излучения, отраженного структурными элементами, к интенсивности излучения, рассеянного средой.

Интраокулярные среды, окружающие радужку (стекловидное тело, водянистая влага между радужкой и роговицей), имеют относительно высокую оптическую прозрачность. Интенсивность рассеянного света в подобных средах описывается законом Рэлея [8]: $I \approx 1/\lambda^4$, λ – длина волны излучения.

Эффективность обратного рассеяния «мягкими», крупномасштабными (по отношению к длине λ) структурными элементами практически не зависит от длины волны излучения [9]. Следовательно, увеличение длины волны ИК-излучения при экспонировании радужки создает условия для повышения контраста изображения. Контрфакторами увеличению длины λ являются уменьшение разрешающей способности фокусирующей оптики, падение чувствительности фотоприемников, возрастание спектрального коэффициента поглощения интраокулярных сред при значениях длины λ свыше 1300 нм и др. В существующих конструкциях ИРТ-систем наиболее часто используется диапазон значений спектра 700...950 нм.

Глубина резкости. Анатомически центральная призрачковая часть радужки отделена от внутренней поверхности роговицы слоем водянистой влаги толщиной 3,5 мм (для нормального глаза) [6]. На периферии радужки значение этой толщины близко к нулю. Следовательно, с учетом показателя преломления водянистой влаги ($n \approx 1,33$) оптическая система должна обеспечивать необходимое пространственное разрешение в плоскости фотоприемника при изменении расстояния от объектива до внутренней поверхности роговицы глаза S (передний отрезок) от $S + 3,5$ до $S + 5$ мм. Принимая во внимание неопределенность положения зрачка в кадре и конечный шаг дискретизации расстояния до объекта dS при автофокусировке, требование

к глубине резкости ΔS , мм, отнесенной к плоскости предмета, можно в первом приближении задать формулой: $\Delta S \approx dS + (3...4)$.

Отметим, что для объектов с низким контрастом, например, радужка глаза в ИК-диапазоне длин волн, при корректном определении глубины резкости ΔS необходим дополнительный учет ряда факторов, в первую очередь, уровня собственных шумов фотоприемника.

Длительность экспозиции. Для оценки оптимальной длительности экспозиции при фоторегистрации радужки глаза следует учесть, что глаз находится в непрерывном движении (нистагм). Движения глаз физиологически необходимы, так как обеспечивают расширение центрального поля зрения и увеличение эффективной разрешающей способности зрительной системы человека [10].

На рис. 2 приведена запись горизонтальных движений глаз человека с нормальным зрением при фиксации взгляда в одной точке [10].

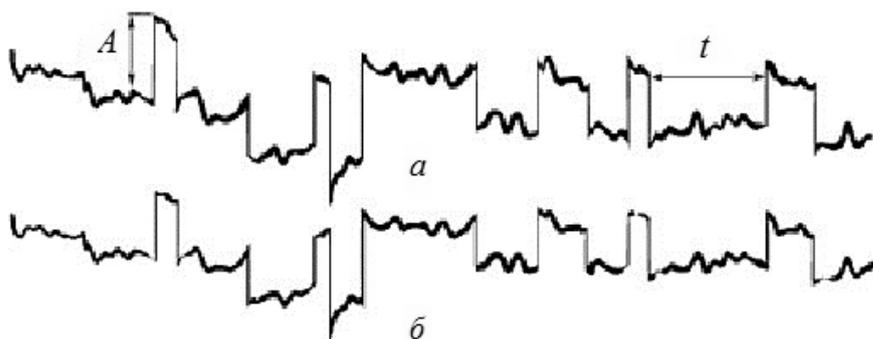


Рис. 2. Запись горизонтальных движений правого (а) и левого (б) глаз человека с нормальным зрением при фиксации взгляда в одной точке:

t – интервал между саккадами; *A* – амплитуда саккады

Скачкообразные движения глаз, или саккады, возникают при рассмотривании неподвижных предметов и представляют собой быстрые повороты глазного яблока (10...80 мс), которые чередуются с периодами неподвижной фиксации взгляда в одной точке. Угол поворота глазного яблока в течение одной саккады колеблется от нескольких угловых минут до нескольких градусов. Во время периодов фиксации длительностью примерно 0,15...2,0 с глаза смещаются за счет глазного тремора, который не прекращается (его амплитуда – несколько угловых минут, а частота – 20...100 Гц). Движения глаз индивидуальны, причем основные закономерности сохраняются у каждого человека на длительный период. Высказываются предположения о возможности использования этих закономерностей для идентификации личности [10].

Для идентификации по радужке глаза такие движения являются помехой, поскольку осуществляются при вращении глазного яблока

относительно некоторого центра, лежащего на зрительной оси на расстоянии около 13,5 мм от вершины роговицы. Поворот глазного яблока, например на $8' \dots 10'$, при треморе (см. рис. 2) соответствует линейному перемещению точки на радужке 30...40 мкм. Таким образом, длительность экспозиции может превышать период глазного тремора и составлять десятки миллисекунд. Однако при желании детального выявления структурных элементов радужки длительность экспозиции не должна превышать нескольких миллисекунд (2...4 мс).

Облученность глаз при экспонировании. Дополнительный негативный фактор IR-технологии в ближнем ИК-диапазоне длин волн – повышенная опасность воздействия излучения на сетчатку глаза и другие внутренние элементы глаза. Анатомические элементы переднего отрезка глазного яблока (от роговицы до границы сенсорной сетчатки) содержат 90 % и более воды. Вследствие этого диапазон значений оптической прозрачности этих структурных элементов находится в спектральной области 400 ... 1300 нм [11]. Поток прошедшего через зрачок ближнего ИК-излучения фокусируется на сетчатке оптической системой глаза практически без ослабления. Поскольку это излучение не воспринимается фоторецепторами сетчатки, защитные реакции организма (сужение зрачка, мигательный рефлекс, адекватные биохимические процессы) отсутствуют.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) облучения глаз указаны в нормативных документах [12–14]. Следует отметить, что международные стандарты [12, 13] устанавливают ПДУ однократного облучения глаз. Системы экспонирования сканеров радужки глаза, удовлетворяющие требованиям этих документов, могут быть использованы в ИРТ-системах, применяемых для конкретного пользователя с промежутками в несколько суток, например для паспортно-визового контроля в аэропортах.

Для сканеров радужки глаза, предназначенных для систем контроля допуска в отдельные помещения и на предприятия, необходимо руководствоваться ПДУ облучения персонала, подвергаемого периодическому регулярному воздействию на глаза ИК-излучения (ПДУ для профессионалов). В настоящее время эти ПДУ определены документом [14]. В рассматриваемых условиях ПДУ для профессионалов (спектральный интервал, длительность облучения при сканировании радужки глаза) примерно в 20 раз ниже ПДУ, устанавливаемых стандартами [12, 13].

Отметим, что основные требования к параметрам системы фоторегистрации радужки глаза детерминированы и должны выполняться в комплексе. Комплексное решение представляет серьезную проблему, поскольку рассмотренные параметры взаимосвязаны. В подобных ситуациях при разработке реальных конструкций необходимы

компромиссы. Применительно к задаче сканирования радужки глаза наиболее распространенный в мировой практике компромисс основан на сознательном снижении требований к разрешающей способности оптической системы до $10...20$ лин./мм. Вследствие уменьшения числовой апертуры такое техническое решение существенно улучшает массогабаритные характеристики сканера, увеличивает глубину резкости, облегчает управление объективом при автофокусировке и масштабировании и др. Однако перечисленные преимущества приводят к потере информации об индивидуальных особенностях строения радужки глаза в диапазоне значений пространственной частоты $(2...5) \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$.

Количество индивидуальных признаков радужки одного глаза, выделяемых при обработке изображений с пониженным пространственным разрешением современными методами кодирования, обеспечивают надежность идентификации личности, соответствующую $EER = 1\%$. Повышение надежности ИРТ-систем при таком качестве оптики можно достичь с помощью включения в состав идентификатора изображения радужки второго глаза [3].

При фоторегистрации с пониженным пространственным разрешением потерянный объем информации об индивидуальных особенностях строения радужки глаза может существенно превышать объем, добавляемый при использовании биометрических признаков второго глаза.

Попытка создания экспериментальной модели сканера радужки глаза (рис. 3), обеспечивающего комплексное выполнение перечисленных технических требований, предпринята Институтом физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси совместно с Научно-производственным республиканским предприятием «КБТЭМО» (Минск).



Рис. 3. Общий вид сканера

Сканер предназначен для опытной эксплуатации в лабораторных условиях, оптимизации основных конструкторских и технологических решений, а также программных средств, необходимых для фоторегистрации и первичной компьютерной обработки радужки глаза в ближнем ИК-диапазоне спектра. Он может быть использован для формирования базы изображений радужки с высоким пространственным разрешением, разработки и апробации КПИ, адаптированной к этим изображениям. Основные элементы конструкции описаны в работах [15, 16].

В приборе предусмотрена система стационарной подсветки (четыре окна по периферии передней панели, см. рис. 3) белым светом, обеспечивающая независимость диаметра зрачка глаза от внешних условий. Система экспонирования представляет группу из восьми ИК-светодиодов (спектральный диапазон излучения 850 ± 25 нм), расположенных по периферии входного окна объектива.

Для прибора спроектирован и изготовлен специальный объектив с разрешающей способностью не менее 100 лин./мм в диапазоне значений 700...900 нм. Объектив обеспечивает наряду с автофокусировкой функции стабилизации размера изображения при перемещении объекта в пределах рабочей дистанции [17]. Суммарная разрешающая способность системы камера – объектив не менее 20 мкм; диаметр регистрируемого изображения радужки 600...640 пиксель, рабочая дистанция от выходного окна объектива до роговицы глаза 300...450 мм; длительность экспозиции 5 мс; время автофокусировки 2...3 с; суммарная энергетическая экспозиция на роговице глаза, включающая в себя автофокусировку и рабочее экспонирование, примерно в 40 раз ниже ПДУ для профессионалов [14].

Рассмотрим изображение радужки темно-карего глаза, структурные элементы которой неразличимы в видимом диапазоне спектра (рис. 4). Для предварительной обработки изображения использован метод локально-адаптивной эквализации (выравнивания) гистограммы. На изображении достаточно четко выявлены нитевидные структурные элементы с характерными поперечными размерами на уровне 40...50 мкм.

Для построения КПИ, адаптированных к изображениям радужки глаза с высоким пространственным разрешением, наиболее перспективно использовать методы предварительной обработки и кодирования изображений, развиваемые во Владимирском государственном университете им. А.Г. и Н.Г. Столетовых под руководством профессора В.Ф. Жиркова [15, 16]. В основу этих методов положен дискретный анализ широкого спектра пространственной частоты предъявляемого изображения, что гармонирует с концепцией разработчиков рассмотренного сканера (см. рис. 4).

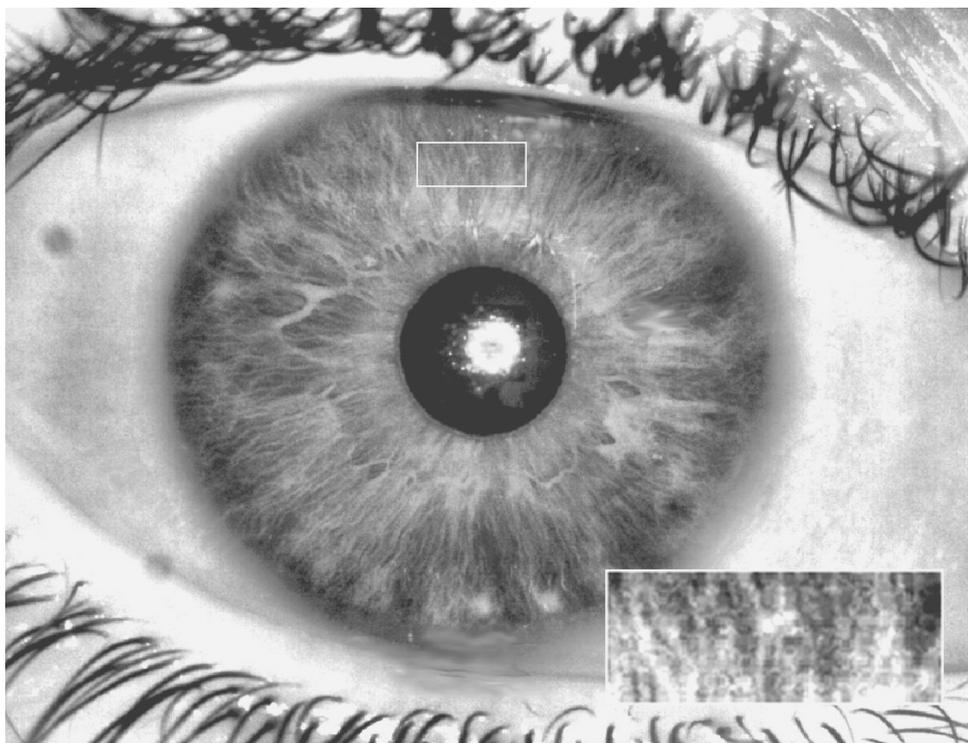


Рис. 4. Изображение радужки глаза (справа приведен увеличенный фрагмент размером 50×130 пиксель)

Заключение. Задача полного выявления индивидуальных особенностей радужки глаза человека (при кажущейся противоречивости требований к системе фоторегистрации) может быть решена современными техническими средствами. Созданный сканер – одна из первых попыток решения этой задачи. Он не предназначен для непосредственного применения в конкретной системе биометрической идентификации личности, а ориентирован на формирование базы изображений радужки с большим числом индивидуальных признаков.

В настоящее время взаимосвязь числа биометрических признаков с потенциальной надежностью идентификации (аутентификации) представляет фундаментальную проблему, решение которой может оказать серьезное влияние на последующее развитие, как IR-технологий, так и других биометрических технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев И. А., Ганькин К. А. Распознавание человека по радужке // Системы безопасности. 2004. № 5. С. 72–76.
2. Давлетханов М. Идентификация по радужке глаза // <http://bre.ru/security/24531.html>.

3. International Biometric Group. Comparative Biometric Testing // Round 7 Public Report. September, 2009. Vol. 1.1. P. 18, 50.
4. Daugman J. G. Biometric Personal Identification System Based on Iris Analysis. U.S. Patent 5,291,560, Mar. 1, 1994. U.S. Pat. Off., Washington, DC.
5. Daugman J. G. High Confidence Visual Recognition of Persons by a Test of Statistical Independence // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. November, 1993. Vol. 25. No. 11. P. 1148–1161.
6. Вит В. В. Строение зрительной системы человека. Одесса: Астропринт, 2003. 656 с.
7. Kollias N. The Spectroscopy of Human Melanin Pigmentation. In: Melanin, Its Role in Human Photoprotection. NY: Valdenmar Publishing Co., 1995. 230 p.
8. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с.
9. Malinka A. Light Scattering by Optically Soft Large Particles of Arbitrary Shape // Journal Opt. Soc. Am. A. 2011. Vol. 28. P. 2086–2090.
10. Филин В. А. Автоматия саккад. М.: Изд-во «Московский Университет», 2001. 263 с.
11. Sliney D., Wolbarsht M. Safety with Lasers and Other Optical Sources. A comprehensive handbook. NY; London: Plenum Press, 1980. 1036 p.
12. ГОСТ Р МЭК 60825-1–2009. Безопасность лазерной аппаратуры. Ч. 1. Классификация оборудования, требования и руководство для потребителей.
13. ГОСТ Р МЭК/ТО 60825-9–2009. Безопасность лазерной аппаратуры. Ч. 9. Компиляция максимально допустимой экспозиции некогерентного оптического излучения.
14. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров № 5804–91. Утв. 31 июля 1991 г.
15. Экспериментальный комплекс для идентификации личности по радужной оболочке глаз / Г.И. Желтов, В.Ф. Жирков, К.В. Новиков и др. // Росс. науч.-практич. конф. по биометрическим технологиям «БТ-2011»: Доклады. М.: ИПИ РАН – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
16. Желтов Г. И., Жирков В. Ф., Новиков К. В. Экспериментальный комплекс для идентификации личности по радужной оболочке глаз / IX Межд. науч. конф. «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2011»: Сб. труд. Владимир – Суздаль, 2011.
17. Пат. Российской Федерации № 2429509. Способ оптической обработки изображения и оптическая система для него / Г.И. Желтов, В.В. Кабанов, Э.С. Гуревич, В.А. Иваненко и др.

Статья поступила в редакцию 14.05.2012