

УДК 28.23.15

ОБ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКА АСИММЕТРИИ ЛИЦА В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ОПЕРАТОРОВ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Б. Н. Епифанцев, А. А. Архипов

*Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),
644080, г. Омск, просп. Мира, 5
E-mail: arkipovit@gmail.com
nigrey.n@mail.ru*

Рассматривается проблема идентификации операторов в процессе взаимодействия с технической системой по тепловому и видимому изображениям лица. Оценена информативность признака «асимметрия лица». Сделан вывод о предпочтительности использования тепловых изображений для решения обозначенной задачи. Получены оценки вероятностей правильной идентификации операторов.

Ключевые слова: человеко-машинная система, изображение лица, асимметрия изображений лиц, идентификационный потенциал асимметрии лиц, тепловые и видимые изображения.

Введение. В последние годы всё более чётко вырисовывается новая проблема в обеспечении надёжности человеко-машинных систем. Речь идёт об интенсивном росте числа случаев несанкционированного доступа человека к управлению технической системой, стимулируемого ожидаемой выгодой [1] или террористическими мотивами [2]. Водитель в состоянии алкогольного или наркотического опьянения — не редкий случай в практике вождения транспортных средств. За пультом управления критически важного объекта можно встретить оператора, находящегося в состоянии крайнего возбуждения или чрезмерно уставшего. Особенно часто подобные случаи встречаются при работе в информационно-вычислительных сетях, когда свой сотрудник (инсайдер) пытается незаконно получить конфиденциальную информацию из доступных баз данных по принуждению третьих лиц или для её продажи [3].

Продвижение в решении обозначенной проблемы видится в создании способов и средств скрытой идентификации операторов человеко-машинных систем и их психофизиологического состояния в процессе профессиональной деятельности. Это позволит сократить роль человеческого фактора в статистике аварий и происшествий в различных приложениях человеческой деятельности. Если принимается решение о подмене лица либо об отклонении психофизиологического состояния оператора от принятого за «нормальное» (адекватное), управление системой блокируется, а принятое решение передаётся в службу безопасности.

Работы по созданию таких способов и средств находятся в стадии постановки задачи [4], отдельные предложения в виде технических решений встречаются в патентной литературе [5]. Определённые успехи достигнуты в идентификации субъектов по изображению лиц в отражённом излучении [6, 7]. Существующие оценки вероятности правиль-

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 541/Е14Ф) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № НК13-07-0246\14).

ного распознавания изображений лиц колеблются от 68,9–88,5 % [8] до 98,55 % [9]. Но в целом «... в настоящее время проведение автоматизированной идентификации по двумерным изображениям лица не обеспечивает должной надёжности принятия решений ... и ... решение задачи надёжной идентификации субъекта относится к одной из главных проблем 21-го века» [10].

Для достижения более высоких значений указанной вероятности и снижения вероятности ложных решений продолжаются исследования по совершенствованию алгоритмов распознавания образов и расширению перечня признаков для описания этих образов. В существующем перечне отсутствуют признаки, характеризующие фундаментальное свойство живых систем — различие правых и левых форм их геометрической структуры [11]. По данным исследований в области медицинской диагностики, симметричными лицами характеризуются только 7,2 % субъектов [12]. Можно предположить, что использование признака «асимметрия лица» позволит повысить надёжность идентификации операторов человеко-машинных систем.

На сегодняшний день нет ответа и на вопрос об устойчивости этого признака для изображений, полученных в разных диапазонах оптического спектра.

Цель предлагаемой работы — снять поставленные вопросы, ограничившись на данном этапе исследований случаем, когда идентифицируемые операторы находились в психофизиологическом состоянии, принятом за нормальное, а исследуемые изображения получены в диапазонах 0,4–0,7 мкм и 8–14 мкм.

Асимметрия изображения лица субъекта. В задачах по разработке систем компьютерного зрения превалирует точка зрения, что лицо человека обладает билатеральной симметрией и вероятность правильного распознавания субъектов не зависит от анализируемой половины лица. Среди 19 признаков, которые должны учитываться при разработке систем распознавания человеческих лиц, признак «асимметрия лица» не фигурирует [13]. В то же время согласно исследованиям психологов наиболее узнаваемыми являются люди с асимметричными лицами [14]. Симметричность, вызванная изменением выражения лица, наиболее сильно проявляется в его средней и нижней частях [15].

Для решения поставленной задачи необходимо располагать базой одновременно полученных тепловых и видимых изображений каждого из тестируемых лиц, находящихся в психофизиологическом состоянии, принятом за нормальное (определялось по частоте пульса, многократно регистрируемого в течение длительного времени). Это требование обусловлено тем, что структура теплового изображения претерпевает изменение в зависимости от состояния сердечно-сосудистой системы и отражает психофизиологическое состояние субъекта. В предложенных для исследования базах изображений это требование не оговорено.

Для достижения поставленной цели была создана база данных, включающая 400 изображений лиц, 200 из которых получены в видимом диапазоне излучений (0,4–0,7 мкм) и 200 — в тепловом (8–14 мкм). Все изображения сняты на одном и том же удалении субъектов от видеокамеры (теповизора) при фиксации взгляда испытуемых на её (его) объектив. Масштабы видео- и тепловизионных снимков несколько различались.

Перечисленные особенности сформированной базы данных не ограничивают достижение поставленной цели — оценки информативности признака «асимметрия лица». При получении изображений в других ракурсах необходимо проводить их нормализацию — приведение к своему эталону [16]. Алгоритмы нормализации и оценка их эффективности с использованием изображений базы данных FERET описаны в [17].

На первом этапе обработки в соответствии с алгоритмом в [18, 19] находились оси билатеральной симметрии, изображённые на рис. 1.

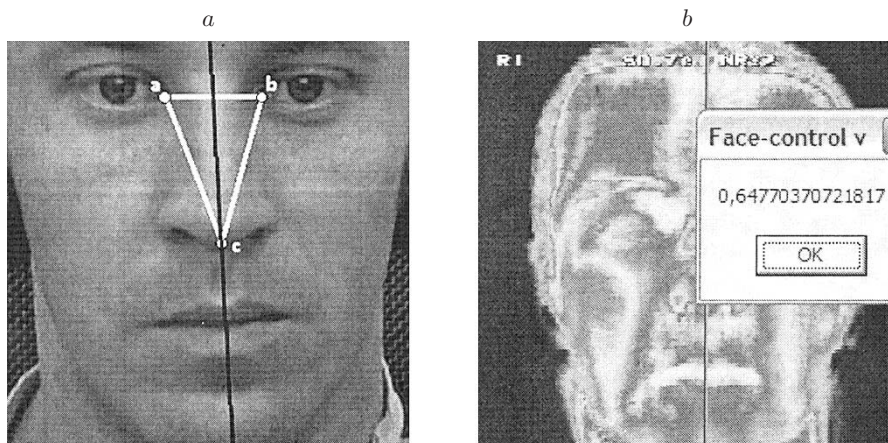


Рис. 1. Формирование оси билатеральной симметрии: для видимого изображения (а) и для теплового изображения (b); число 0,6477 — коэффициент корреляции изображений левой и правой половин лица

1. С помощью итеративного обучаемого алгоритма, описанного в [20, 21], на изображении выделяются ключевые точки — внутренние и внешние уголки глаз; через внутренние ключевые точки проводится прямая.

2. Производится поворот изображения на угол α — плоский угол между прямой, проходящей через ключевые точки в уголках глаз, и осью абсцисс (операция нормализации изображения относительно наклона головы).

3. Через середину отрезка, соединяющего ключевые точки, параллельно оси ординат проводится предполагаемая линия симметрии, относительно которой изображение оказывается разделено на две части равного размера.

4. Определяется размер анализируемого изображения и вычисляется коэффициент корреляции левой и правой половин лица.

Принято делить лицо на верхнюю, среднюю и нижнюю зоны (правило К. Хутера [22]). Первая располагается от линии волос до линии бровей, средняя равна длине носа, нижняя начинается от линии ноздрей и включает губы и подбородок. Расстояние между внешними ключевыми точками глаз несколько меньше средних значений суммарной длины второй и третьей зон и удвоенной длины первой зоны. По этим данным относительно линии, соединяющей ключевые точки глаз, определяются координаты нижней ($y_n = 2x_k$) и верхней ($y_v = x_k$) границ исследуемого лица, $2x_k$ — расстояние между внешними ключевыми точками глаз. Принимая точку пересечения предполагаемой линии симметрии с найденной нижней границей изображения лица за начало координат, вычислим искомый коэффициент (далее коэффициент симметрии лица):

$$r = \frac{\sum_{\mu=1}^M \sum_{\pi=1}^N [B_{\text{л}}(-x_{\mu}, y_{\pi}) - \bar{B}_{\text{л}}][B_{\text{п}}(x_{\mu}, y_{\pi}) - \bar{B}_{\text{п}}]}{\sqrt{\left\{ \sum_{\mu=1}^M \sum_{\pi=1}^N [B_{\text{л}}(-x_{\mu}, y_{\pi}) - \bar{B}_{\text{л}}]^2 \right\} \left\{ \sum_{\mu} \sum_{\pi} [B_{\text{п}}(x_{\mu}, y_{\pi}) - \bar{B}_{\text{п}}]^2 \right\}}},$$

где $B_{\text{л}}(-x_{\mu}, y_{\pi})$, $B_{\text{п}}(x_{\mu}, y_{\pi})$ — матрицы значений интенсивности пикселей левой и правой частей изображения лица; $M = x_k/\Delta x$, $N = 3x_k/\Delta y$ — количество пикселей на каждой из них; Δx , Δy — интервалы дискретизации по соответствующим осям; $\bar{B}_{\text{л}}$, $\bar{B}_{\text{п}}$ — средние значения интенсивности сравниваемых изображений.

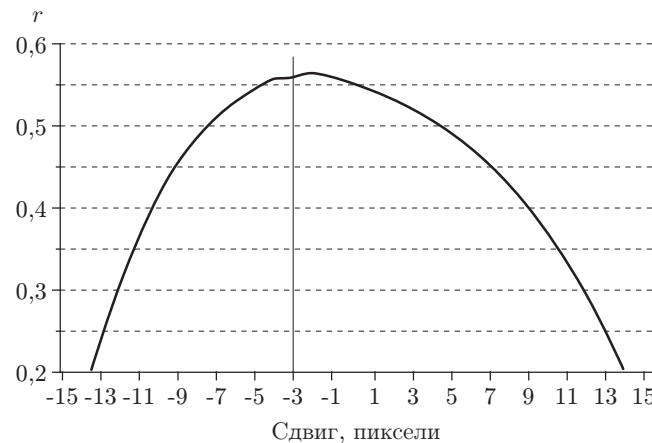


Рис. 2. Изменение значения коэффициента симметрии при сдвиге оси симметрии

5. Найденная линия последовательно сдвигается на расстояние до 15 пикселей в каждую сторону. При каждом сдвиге вычисляется коэффициент симметрии r . По максимальному значению r (рис. 2) определяется положение линии симметрии.

Различия в отдельных областях левой и правой половин лица сглаживаются при нахождении коэффициента симметрии по всему изображению. Проведённые нами исследования показали, что при предъявлении полосок лица экспертам наивысший процент распознавания субъектов приходится на область, положение и размер которой показаны на рис. 3, *a* светлой полоской. Дальнейшее увеличение её площади незначительно отражается на повышении вероятности идентификации. В силу обозначенной выше направленности данной работы отмеченный эффект учтён использованием трёх областей лица (рис. 3, *b*), размер каждой из которых по оси y сверху вниз равен соответственно x_k , x_k , $0,22x_k$ и которые отделены друг от друга интервалами $0,14x_k$. Размер полосок по оси абсцисс ограничен внешними ключевыми точками глаз. Гистограммы коэффициентов симметрии r_1, r_2, r_3 для выделенных трёх частей изображений лиц в базе данных приведены на рис. 4. Использование пикселей всех полосок позволяет определить интегральный коэффициент корреляции r .

Наименее информативной оказалась нижняя область.

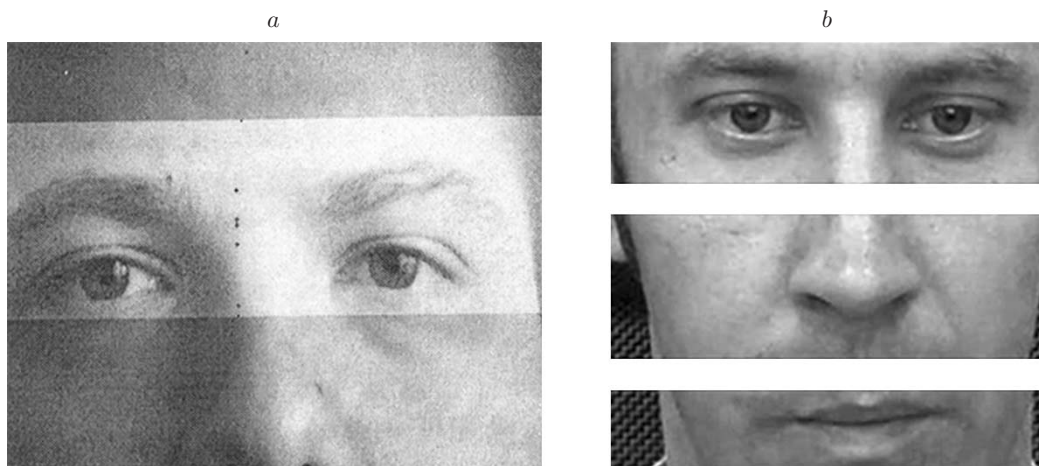


Рис. 3. Изображение части лица, идентифицируемой экспертами: с наибольшей вероятностью (*a*) и выбранные участки областей для исследования симметрии лица (*b*)

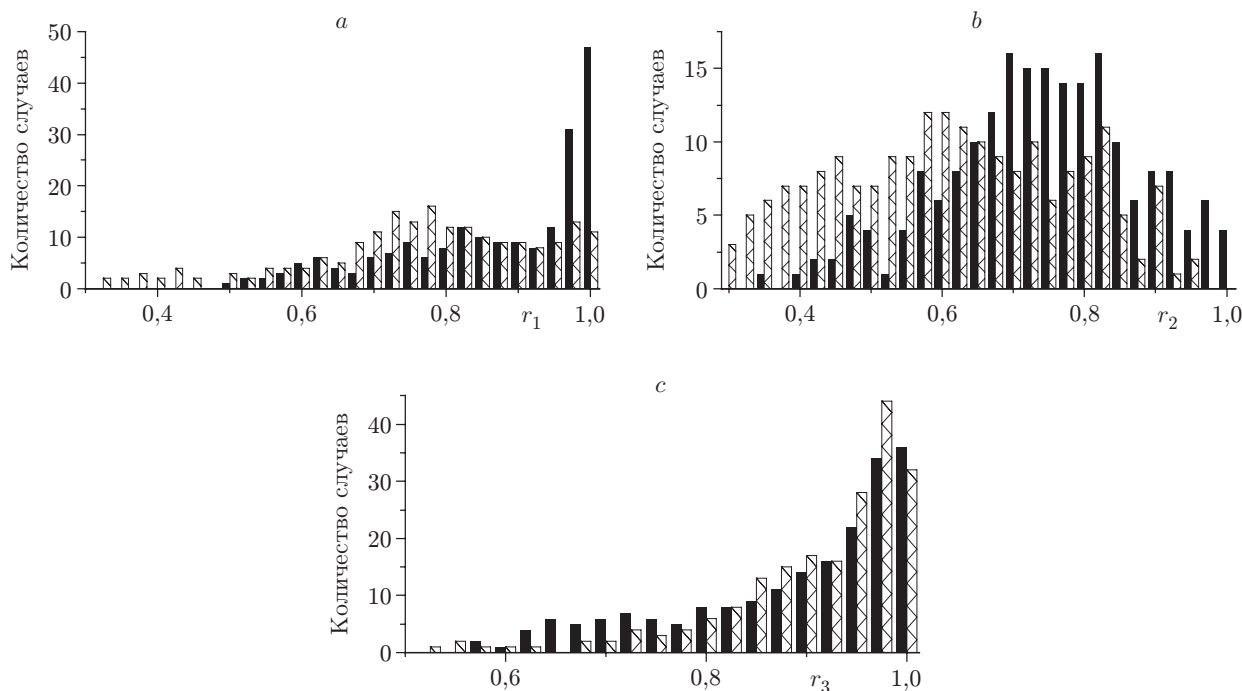


Рис. 4. Гистограммы коэффициентов корреляции левой и правой частей изображений лиц: верхняя (а), средняя (b), нижняя (с) области лица (чёрные столбцы — видимое изображение, столбцы со штрихами — тепловое изображение)

Алгоритм идентификации изображений лиц. По имеющимся в базе данных изображениям лиц каждого субъекта построены эмпирические плотности распределения коэффициентов корреляции изображений левой и правой областей лиц r и их отдельных частей r_1-r_3 (рис. 5).

По критерию согласия χ^2 -Пирсона определены выравнивающие кривые $P(r_j/H_i)$, принятые в качестве эталонных при проведении вычислительных экспериментов по идентификации субъектов, H_i — номер i -го субъекта (гипотезы), r_j — признак j , $j \in [1; 4]$, для каждого вида изображений (видимых, тепловых). После формирования базы эталонов $P(r_j/H_i)$ для всех классов i ($i = 1, 2, \dots, n$) и признаков j реализуется алгоритм идентифи-

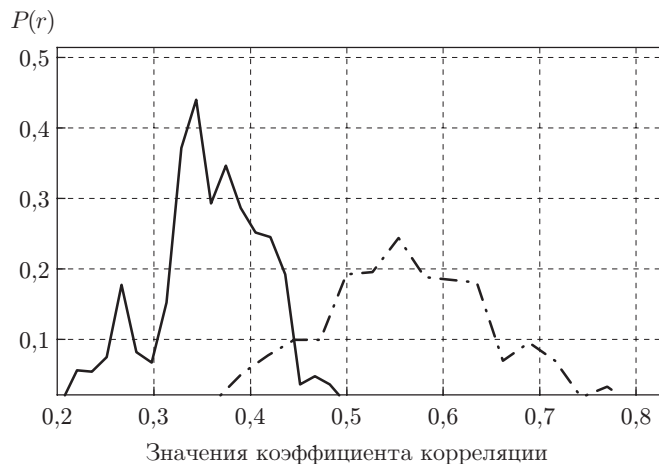


Рис. 5. Эмпирические плотности распределения признака r на термографическом изображении лица для двух испытуемых

кации. В качестве такого алгоритма используем модифицированную формулу Байеса [23]

$$P(H_i/r_j) = P(\Gamma_{ij})P(r_j/H_i) / \sum_{i=1}^n P(\Gamma_{ij})P(r_j/H_i),$$

где $P(r_j/H_i)$ — апостериорные вероятности гипотез H_i при значении признака r_j , $P(\Gamma_{ij})$ — априорные вероятности i -х гипотез при поступлении j -го признака. Если они не известны, принимаем

$$P(\Gamma_{ij}) = n^{-1}, \text{ если } j = 1; \quad P(\Gamma_{ij}) = 0,5[P(\Gamma_{i1}) + P(H_i/r_1)], \text{ если } j = 2;$$

$$P(\Gamma_{ij}) = m^{-1} \sum_{\nu=j-1}^{j-m} P(H_i/r_\nu), \text{ если } j > m.$$

При поступлении первого признака r_1 в систему априорные вероятности гипотез принимаются одинаковыми, т. е. n^{-1} . На следующем шаге (поступление признака r_2) эти вероятности формируются с учётом начальных данных (n^{-1}) и вероятностей гипотез на предыдущем шаге, учёт предыстории изменения априорных данных определяется параметром m , значение которого в конкретной задаче подбирается экспериментально. Таким образом, при использовании очередного признака r_j автомат учитывает не только апостериорную вероятность $P(r_j/H_i)$, но и результаты принятых на предыдущих шагах решений $P(H_i/r_\nu)$. Процесс продолжается после анализа всех имеющихся признаков. По максимальной вероятности $P(H_i/r_4)$ принимается решение об имеющей место быть гипотезе.

Для получения тестовой выборки использован набор генераторов псевдослучайных чисел с параметрами соответствующих распределений $P(r_j/H_i)$. Смоделировано по 20000 значений признаков симметрии лица (видимого и теплового изображений) и соответствующих его частей. По максимуму финальных вероятностей $P_k(H_i/r_8)$ определялась вероятность правильной идентификации, k — номер испытания. Что касается вероятности ошибок идентификации Q , она зависит от числа гипотез n и количества используемых признаков $j \in [1; 8]$ (четыре — для описания изображений, полученных в диапазоне излучений 0,4–0,7 мкм, четыре — в 8–14 мкм). По результатам вычислительного эксперимента вероятность может быть описана регрессионной зависимостью с погрешностью не более 7 %:

$$Q(n, j) = \begin{cases} P(n, j), & \text{если } P(n, j) \geq 0, \\ 0, & \text{если } P(n, j) < 0, \end{cases}$$

$$P(n, j) = 0,5[(0,037 - 0,011 \ln j)n - (0,021 \ln j) - 0,1282].$$

При $n = 10$ и $j = 4$ оценка вероятности Q составляет $\sim 0,05$. Можно сделать вывод, что идентификационный потенциал признака «асимметрия лица» ограничен двумя десятками субъектов. На его основе могут создаваться системы биометрического доступа в информационно-вычислительную систему через терминал в коллективах средней численности.

Другой показатель систем распознавания образов — вероятность правильной идентификации. Данные по оценке этого показателя, полученные в рамках проведённого вычислительного эксперимента, приведены в таблице.

Вероятности правильной идентификации субъектов по изображениям их лиц

Количество изображений субъекта, использованных для формирования эталона		Вероятности правильной идентификации				
		по симметрии верхней части лица r_1	по симметрии средней части лица r_2	по симметрии нижней части лица r_3	по симметрии лица в целом r	с учётом всех показателей $r_1—r_3, r$
Видимые изображения (0,4–0,7 мкм)	5	0,668	0,688	0,540	0,720	0,820
	10	0,716	0,693	0,577	0,734	0,861
	20	0,715	0,760	0,600	0,770	0,865
Тепловые изображения (8–14 мкм)	5	0,604	0,780	0,485	0,780	0,920
	10	0,620	0,830	0,530	0,821	0,938
	20	0,620	0,840	0,534	0,840	0,939

Обращают на себя внимание два обстоятельства.

При увеличении количества изображений субъекта для построения его эталона R вероятность правильной идентификации стабилизируется и при $R > 10$ значимых отличий в результатах не наблюдается.

Тепловые изображения лица субъекта с точки зрения их идентификационного потенциала более предпочтительны, нежели полученные в видимом диапазоне излучений.

Различные подходы к оценке итоговой вероятности события по совокупности вероятностей, сформированных с использованием отдельных признаков, рассмотрены в [23, 24]. Если воспользоваться подходом, основанным на общей теореме о повторении опытов, то оценку вероятности H_i по вероятностям, достигнутым в N независимых опытах, можно получить по результату анализа производящей функции

$$\varphi_N(z) = \prod_{i=1}^N (q_{ij} + P_{ij}z),$$

где $q_{ij} = 1 - P_{ij}$, P_{ij} — вероятность i -й гипотезы по информации j -го признака. Коэффициент при z^0 есть вероятность P_{0N} того, что рассматриваемая гипотеза не верна. Тогда с вероятностью $q_{0N} = 1 - P_{0N}$ она признаётся справедливой. Для такой комбинации $P_{ij} = 0,865$ и $0,939$ (см. таблицу) итоговая вероятность идентификации составляет $0,99$.

Заключение. При небольших группах идентифицируемых лиц (порядка 10–20 субъектов) информативность признака «симметрия изображения лица» достаточна для получения результатов по их идентификации на современном уровне.

При большем количестве субъектов рекомендуется включить его в уже сформированное для решения конкретной задачи пространство признаков.

Повысить идентификационный потенциал различия правой и левой половин лица возможно с увеличением количества спектральных каналов по регистрации изображений лица либо сравниваемых на них фрагментов (в специальной литературе насчитывают шесть таких фрагментов [22]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Епифанцев Б. Н., Пятков А. А. Математическая модель противоборства конфликтующих сторон // Безопасность в техносфере. 2012. № 5. С. 55–59.

2. **Белоножкин В. И., Остапенко Г. А.** Информационные аспекты противодействия терроризму. М.: Горячая линия–Телеком, 2011. 112 с.
3. **Скиба В. Ю., Курбатов В. А.** Руководство по защите от внутренних угроз информационной безопасности. С.-Пб.: Питер, 2008. 320 с.
4. **Nogueira P. A., Rodrigues R., Oliveira E., Nacke L. E.** A hybrid approach at emotional state detection: Merging theoretical models of emotion with data-driven statistical classifiers // IEEE/WIC/ACM Intern. Conf. Intelligent Agent Technology. Atlanta, USA, 17–20 Nov., 2013. Vol. 2. P. 253–260.
5. **Пат. на изобретение 2392848 РФ.** Способ диагностики стресса у человека /М. М. Лапкин, Р. П. Карасев. Опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18.
6. **Li R.-D., Zhu L., Yu D.-J., Chen K.-X.** Making discriminative common vectors applicable to face recognition with one training image per person // Zhejiang-Daxue-xuebao Lixue ban (Journ. of Zhejiang Univ.: Sci. Ed.). 2008. **35**, N 2. P. 181–184.
7. **Zhao W.** Face recognition: A literature survey // Journ. ACM Comput. Surveys. 2003. **35**, N 4. P. 399–458.
8. **Mlakar T., Zaletelji J., Tasic J. F.** Registracija slik obrazov za izboljšanje uspesnosti razpoznavanja oseb (Face image registration for improving face recognition rate) // Elektrotehn Vestn. 2007. **74**, N 1–2. P. 43–48.
9. **Domboulas D. I., Fargues M. P., Karunasiri G.** Uncooled infrared-imaging face recognition using kernel-based generalized discriminant analysis // Opt. Eng. 2007. **46**, N 8. 087201.
10. **Гермогенов А. П.** Биометрические технологии идентификации личности и вопросы информационной безопасности их применения в государственных системах // Бизнес и безопасность в России. 2007. № 46. С. 45–49.
11. **Кизель В. А.** Физические причины диссимметрии живых систем. М.: Наука, 1985. 120 с.
12. **Брагина Н. Н., Доброхотова Т. А.** Функциональные асимметрии человека. М.: Медицина, 1988. 204 с.
13. **Sinha P.** Face recognition by humans: Nineteen results all computer vision researchers should know about // Proc. IEEE. 2006. **94**, N 11. P. 1948–1962.
14. **Schmid K., Marx D., Samal A.** Computation of a face attractiveness based on neoclassical canons, symmetry and golden ratios // Patt. Recogn. 2008. **41**, N 8. P. 2710–2717.
15. **Borod J. D., Koff E., Schmidt J. M., Santschi C. M.** Facial asymmetry during emotional expression: gender, valence and measurement technique // Psychophysiology. 1998. **36**, N 11. P. 1209–1215.
16. **Путянин Е. П.** Нормализация и распознавание изображений. URL: <http://sumschool.sumdu.edu.ua/is-02/rus/lectures/pytyatin/pytyatin.htm> (дата обращения: 15.08.2014).
17. **Нюнькин К. М.** Распознавание изображений лица человека с произвольным ракурсом // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2006. № 6. С. 22–28.
18. **Liu A., Zhon Y., Guan X.** Improved ASM method of face localization // Comput. Eng. 2007. **33**, N 18. P. 227–229.
19. **Liu Y., Weaver R. L., Schmidt K. L., Cohn J. F.** Facial asymmetry quantification for expression invariant human identification // Proc. of the 5th IEEE Intern. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition (FGR 2002). Washington, USA, 20–21 May, 2002. P. 208–214.

-
20. **Loy G., Zelinsky A.** Fast radial symmetry for detecting points of interest // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. **25**, N 8. P. 959–973.
 21. **Lien J., Kanade T., Cohn J. F., Li C. C.** Detection, tracking, and classification of subtle changes in facial expression // Journ. Robotics and Autonomous Systems. 2000. **31**. P. 131–146.
 22. **Паршукова Л. П., Карлышев В. М., Шакурова З. А.** Физиогномика. Ростов н/Д: Феникс, 2004. 384 с.
 23. **Епифанцев Б. Н., Ложников П. С., Сулавко А. Е.** Сравнение алгоритмов комплексирования признаков в задачах распознавания образов // Вопросы защиты информации. 2012. № 1. С. 60–66.
 24. **Куликов В. А., Иванова Е. В.** Метод обнаружения оставленных предметов по последовательности дальностных изображений // Автометрия. 2012. **48**, № 6. С. 29–34.

Поступила в редакцию 15 августа 2014 г.
