

Н. С. Баша, Л. А. Шулъга

СИСТЕМА ВЫДЕЛЕНИЯ ПОДКОЖНОГО КРОВЕНОСНОГО РИСУНКА ПО ТЕРМОГРАФИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Разработана система автоматического выделения подкожного кровеносного рисунка по термографическим изображениям и алгоритмы автоматического выделения открытых участков тела на термограмме и получения сосудистого рисунка. Приведены результаты работы системы на термографических изображениях пациентов с варикозным расширением вен второй степени, а также результаты применения разработанного подхода для задачи выделения кровеносного рисунка лица человека на базе данных, состоящей из 371 термографического портрета 25 человек разного пола, возраста и телосложения, в различное время суток.

E-mail: natalia.basha@niipa.ru

Ключевые слова: распознавание образов, анализ изображений, термографическая медицинская диагностика, кровеносный рисунок, детекция лица.

Инфракрасная термография — один из перспективных и широко применяемых методов диагностики заболеваний и динамического контроля в процессе лечения пациента. Достоинствами метода являются высокая информативность, бесконтактность, неинвазивность, простота, наглядность, повторяемость и полная безопасность для пациента.

Температура поверхности кожных покровов, которую регистрирует термограф, определяется рядом внутренних и внешних факторов, важнейшими из которых являются уровень метаболизма, кровообращения, а также теплопроводность тканей, прилежащих к исследуемой зоне. Термография непосредственно отражает функциональное состояние тканей и органов. При развитии патологий нарушается нормальная термотопография исследуемой области [1].

Сложность выделения кровеносного рисунка по термографическим изображениям заключается в том, что изображения сосудов человеческого тела не имеют четко выраженных границ. Распределение температуры на термограммах выглядит размытым. Это связано с влиянием теплопроводности ткани тела человека.

В данной статье предложен механизм выделения сосудистого рисунка на термографических изображениях и рассмотрены варианты его применения.

1. Метод выделения сосудов. Разработанный *алгоритм выделения кровеносного рисунка* состоит из двух этапов, показанных на рис. 1.



Рис. 1. Схема алгоритма выделения кровеносного рисунка

Выделение на первом этапе открытых участков тела на термографических изображениях осуществляется с помощью пороговой бинаризации. Экспериментально установлено, что температура поверхности тела человека в нормальных условиях колеблется от 27 до 36 °С. В качестве порогового значения бинаризации выбрана нижняя граница интервала температур, т.е. 27 °С. Выделяемая область соответствует открытым участкам тела (рис. 2, б).

На втором этапе (см. рис. 1) проводится сегментация сосудистого рисунка в диагностируемой области. Слабые границы сосудов, размытые вследствие диффузии теплоты, могут быть усилены с помощью фильтра анизотропной диффузии, применение которого заключается в выравнивании значения температур внутри областей с помощью моделирования процесса теплопроводности. Изменение температуры в исследуемой области пропорционально изменению функции теплопроводности. Для дискретного фильтра анизотропной диффузии вычисляются четыре коэффициента диффузии и четыре градиента, соответствующие четырем направлениям (на север, на юг, на восток и запад) [2]. Коэффициент в северном направлении вычисляется по формуле

$$C_{N,\tau}(x, y) = \exp\left(\frac{-\nabla I_{N,\tau}^2(x, y)}{k^2}\right),$$

где $I_{N,\tau} = I_\tau(x, y + 1) - I_\tau(x, y)$ и $I_\tau(x, y)$ – термографические изображения в момент времени τ ; ∇I – градиент термографического изображения в соответствующем направлении; N – направление на север, k – порог чувствительности к краю. Оставшиеся коэффициенты вычисляются аналогично.

Отфильтрованное изображение на каждом шаге вычисляется рекуррентно по формуле

$$I_{\tau+1}(x, y) = I_{\tau} + \frac{1}{4}[C_{N,\tau}(x, y)\nabla I_{N,\tau}(x, y) + C_{S,\tau}(x, y)\nabla I_{S,\tau}(x, y) + C_{E,\tau}(x, y)\nabla I_{E,\tau}(x, y) + C_{W,\tau}(x, y)\nabla I_{W,\tau}(x, y)]. \quad (1)$$

Дальнейшая локализация сосудистого рисунка по отфильтрованному изображению I' происходит с помощью морфологических операций дилатации и эрозии:

$$I_{open} = (I' \otimes S) \oplus S,$$

$$I_{morph} = I' - I_{open},$$

где I' , I_{open} , I_{morph} — фильтрованное, разомкнутое (открытое) и результирующее изображения соответственно, S — структурный элемент, \otimes и \oplus — морфологические эрозия и дилатация соответственно [5].

Далее изображение I_{morph} скелетизируется (см. рис. 2, б) [3]. Для скелетизации изображение сосудистого рисунка бинаризуется с порогом δ . Экспериментально был подобран порог бинаризации δ , позволяющий наиболее полно выделить рисунок сосудистого русла.

Разработанный алгоритм апробирован на задаче выделения кровеносного рисунка нижних конечностей пациентов с варикозным расширением вен второй степени. На рис. 2, а приведен пример термографического изображения обеих нижних конечностей. Результат применения алгоритма автоматического выделения кровеносных сосудов продемонстрирован на рис. 2, б. Как видно, полученный скелетизированный кровеносный рисунок соответствует подкожному сосудистому рисунку.

Эффективность разработанного метода автоматического выделения подкожного кровеносного рисунка проверена на задаче детекции сосудистого рисунка лица человека. Кровеносные сосуды лица являются более мелкой кровеносной сетью и визуально не видны на

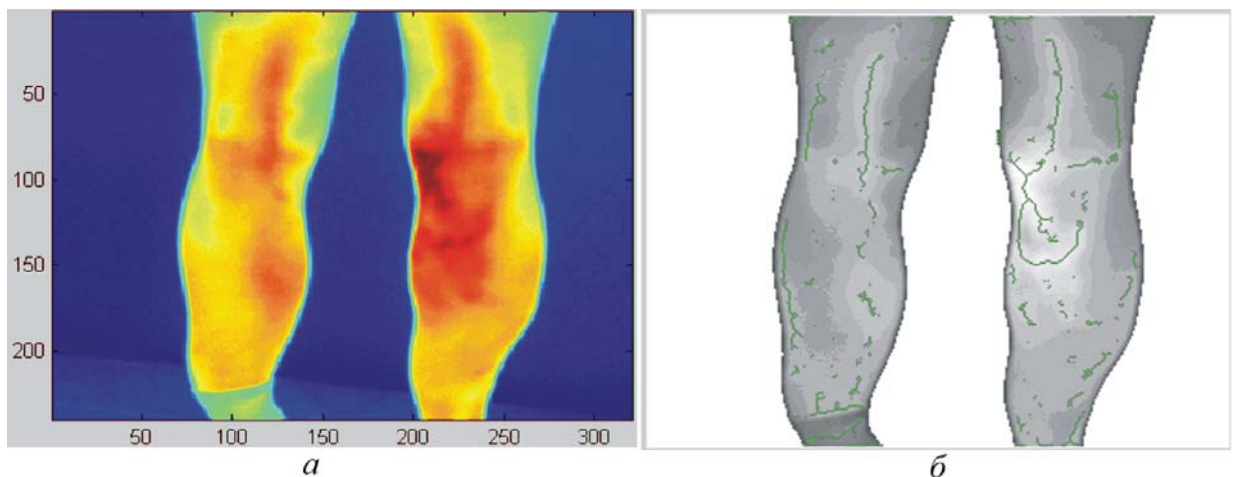


Рис. 2. Выделение кровеносного рисунка ног:

a — термографическое изображение пациента с варикозным расширением вен второй степени; *б* — результат выделения кровеносного рисунка

термографическом изображении. Разработана система выделения кровеносного рисунка лица человека, состоящая из подсистем автоматической детекции лица на термографическом снимке и экстракции кровеносного рисунка.

Рассмотрим построение системы.

2. Система выделения кровеносного рисунка лица человека.

Алгоритм автоматического выделения лица на термографических изображениях основан на физиологических особенностях человека, а именно на том, что внутренние углы глаз являются устойчивыми областями гипертермии [4]. Размеры области лица определяются на основе коэффициентов пропорциональности лица и положения линии глаз. Алгоритм выделения лица состоит из четырех этапов: выделения области, подозрительной на лицо; вычисления интервала для нахождения области глаз; поиска линии глаз; определения области лица.

Первый этап: выделение области, подозрительной на лицо. Для выделения области, подозрительной на лицо, используется метод пороговой фильтрации. В результате экспериментальных исследований установлено значение порога на уровне $T_{\min} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{3}$, где T_{\min} и T_{\max} — минимальное и максимальное значения температуры тела человека. Отметим, что значение порога определяется температурой кожи и не зависит от температуры одежды и волосяного покрова.

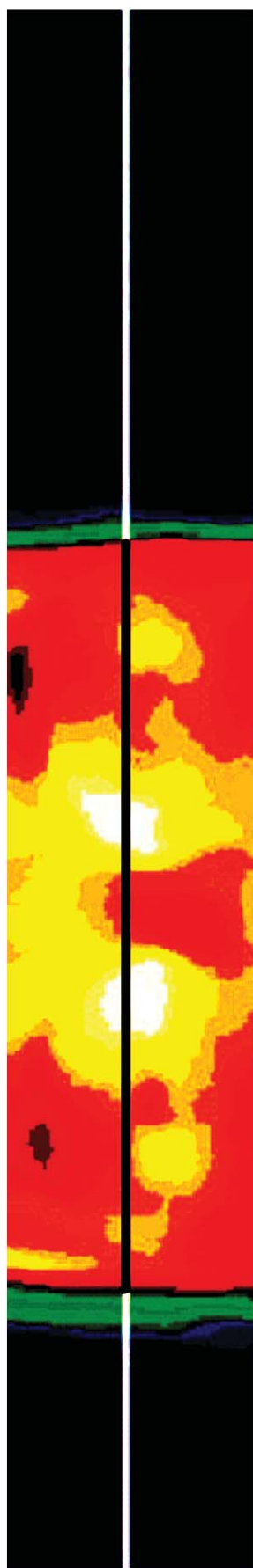
Второй этап: вычисление интервала для нахождения линии глаз. Исходя из геометрических пропорций лица, определяется теоретическое значение линии глаз как

$$Y_{eye} = Y_{top} + round(0,68 \times W),$$

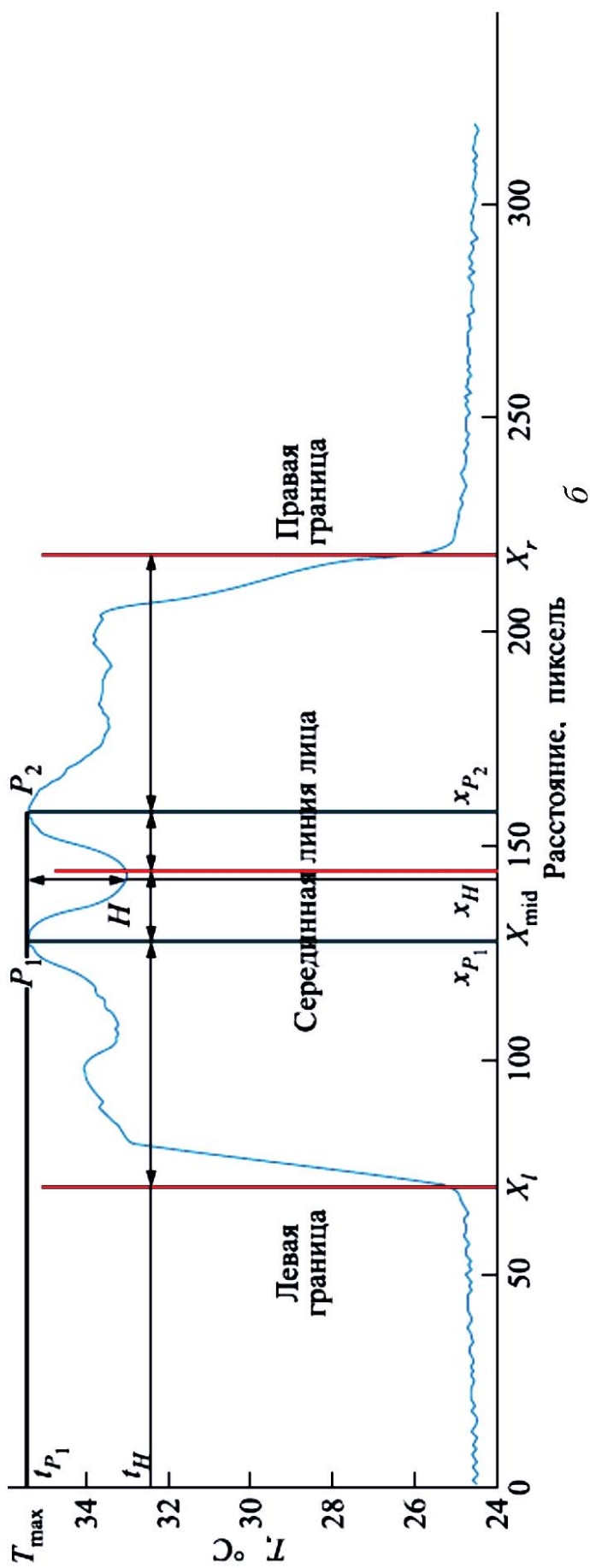
где Y_{eye} — теоретическое значение строки линии глаз; Y_{top} — значение строки верхней точки головы; W — значение в пикселях ширины лица, вычисленное как мода выделенной области. Установлено, что значение моды ширины области, подозрительной на лицо, соответствует ширине лица на уровне глаз. Интервал для нахождения линии глаз задается как $[Y_{eye} - border; Y_{eye} + border]$. Экспериментально установлено оптимальное значение интервала $border = 20$ строк.

Третий этап: поиск линии глаз. Для нахождения линии глаз на выделенном интервале осуществляется построчный проход маской с двумя пиками (обозначаемыми P_1 и P_2) и впадиной H . На термограмме (рис. 3, а) линией выделена строка, содержащая внутренние углы глаз; на рис. 3, б проиллюстрировано построение маски для нахождения линии глаз в выделенной области.

Среди строк, удовлетворяющих условиям маски, в качестве линии глаз (см. рис. 3, б) выбирается строка y_0 , для которой выполняются



a



б

Рис. 3. Принцип построения теплового профиля линии внутренних углов глаз:
a — часть исходного изображения термограммы лица; *б* — тепловой профиль, соответствующий термограмме

равенства

$$\begin{aligned}t_{P_1} &= T_{\max} \text{ или } t_{P_2} = T_{\max}; \\x_{P_1} - W &= W - x_{P_2}; \\x_{P_1} - X_l &= X_r - x_{P_2}; \\x_H &= X_{\text{mid}}; \\x_{P_1} - X_l &= X_r - x_{P_2}; \\T_{\max} - t_H &> 0,5,\end{aligned}\tag{2}$$

где t_i — значение температуры в точке (i, y_0) , а x_i — абсцисса точки (i, y_0) , T_{\max} — максимум температуры на интервале для нахождения линии глаз; X_l и X_r — левая и правая границы лица, соответственно; X_{mid} — срединная линия области, подозрительной на лицо. Экспериментально установленное пороговое значение разницы температур между пиком и впадиной равно $0,5$ °С.

Четвертый этап: определение области лица. По выделенной линии глаз вычисляется ширина лица на уровне глаз, верхний угол прямоугольника, заключающий лицо, его длина и ширина. Определенная таким образом область лица выделяется и масштабируется до заданного размера (рис. 4).

Выделение подкожного кровеносного рисунка лица выполняется согласно разработанному алгоритму, рассмотренному в разделе 1. Результат работы алгоритма приведен на рис. 5, а. Далее изображение скелетизируется (рис. 5, б).

Экспериментальные результаты. Разработанная система выделения кровеносного рисунка лица человека апробирована на базе термографических данных. База данных портретных термографических изображений получена термографом “ИРТИС-2000МЕ”. База данных содержит 371 снимок 25 человек разного возраста, пола и телосложения. Термограммы получены в разное время суток при различных условиях окружающей среды (в помещении и на улице). Сбор данных проводился еженедельно в течение года. Термографические изображения представляют собой матрицу температур размером 240×320 ,

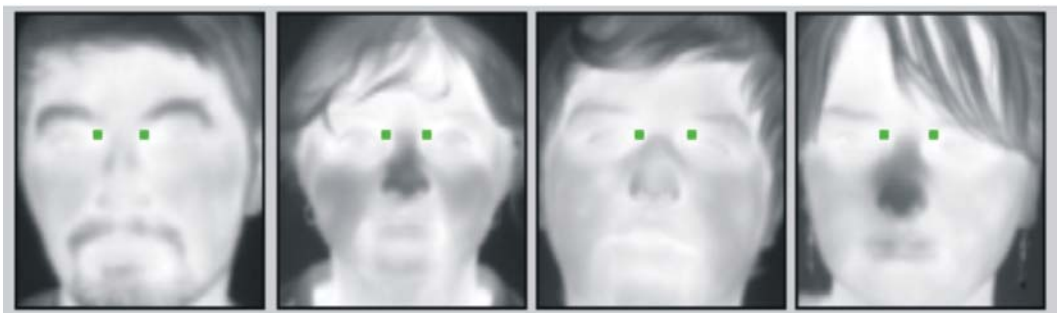


Рис. 4. Результат работы алгоритма автоматического выделения области лица

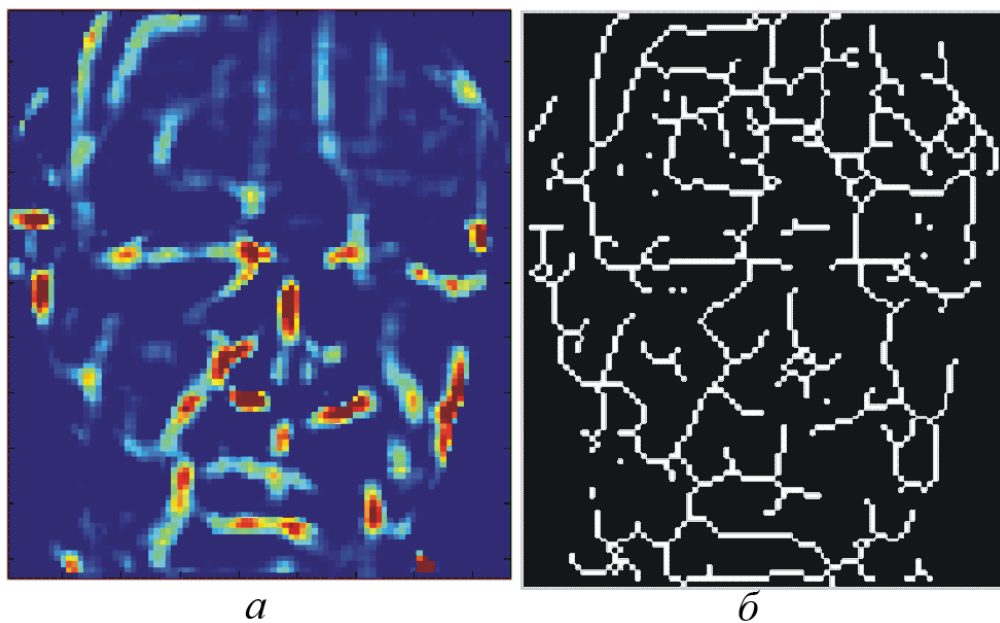


Рис. 5. Выделение индивидуальных физиологических данных: *а* — выделение подкожного кровеносного рисунка; *б* — скелет кровеносного рисунка

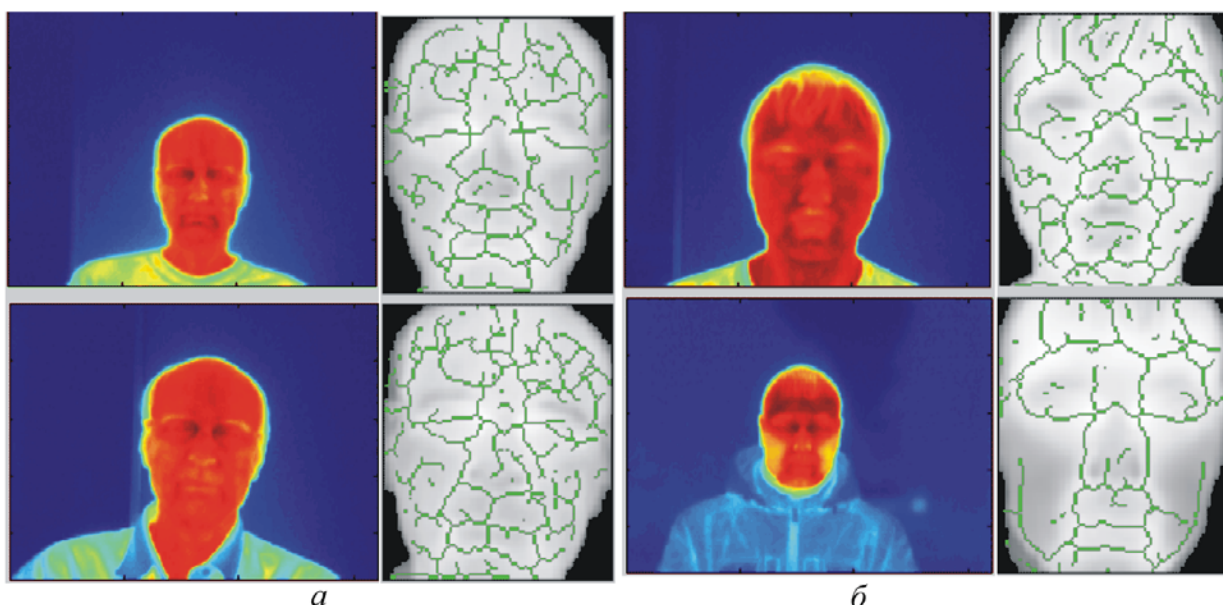


Рис. 6. Выделение кровеносного рисунка (слева — исходное термографическое изображение, справа — результат выделения кровеносного рисунка:

а — изображение человека, снятого в разное время; *б* — изображение человека, снятого в лабораторных условиях (верхний кадр) и на открытом воздухе (нижний кадр)

снятых в спектральном диапазоне 3...5 мкм, с точностью изменения температур 0,01 °С.

Результат выделения кровеносной сети продемонстрирован на рис. 6, *а*, который получен для одного человека, снятого в разное время (с интервалом в 2 месяца). Выделенный сосудистый рисунок остался прежним с течением времени. Небольшие изменения характеризуются текущим состоянием организма [2].

Для расширения класса задач применения системы проведено исследование влияния температуры окружающей среды на качество вы-

деления кровеносного рисунка лица. Термографические изображения, снятые в лабораторных условиях, сравнивались с изображениями на морозе (при температуре -15°C , время нахождения на открытом воздухе составляло до 1 ч). Результат выделения сосудистого рисунка приведен на рис. 6, б. Как видно, кровеносный рисунок не изменился и стал более выраженным.

Выводы. Предложена система автоматического выделения подкожного сосудистого рисунка на термографических изображениях. Разработанный метод позволяет детектировать сосудистый рисунок при различных условиях. Метод выделения сосудистого рисунка может найти применение в различных задачах автоматизированной медицинской диагностики и других прикладных областях.

Из результатов экспериментальных исследований следует, что выделяемый кровеносный рисунок лица не изменяется при различных условиях окружающей среды, таких как перегрев, охлаждение; при изменении диаметра (состояния) сосудов, связанных с употреблением алкоголя и курением; при распространенных вирусных и респираторных заболеваниях на разных их стадиях; при различных психоэмоциональных состояниях и физической активности.

Результаты тестирования позволяют сделать заключение, что достижение более точного выделения кровеносного рисунка возможно двумя способами: 1) использованием термографических камер с большей точностью измерения температур для улучшения качества изображений и 2) проведением дополнительного исследования морфологических операций, используемых для выделения кровеносного рисунка и последующим “усилением” кровеносного рисунка с помощью фильтров Габора [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н е к о т о р ы е аспекты применения термографии при реабилитации пациентов с нарушением функций опорно-двигательной и нервной систем / В.И. Виноградов, И.С. Веретенков, В.Н. Слезко и др. // Функциональная диагностика. – 2005. – № 3. – С. 72–78.
2. B u d d h a r a j u P., P a v l i d i s P., T s i a m y r t z i s P., B a z a k o s M. Physiology-based face recognition in the thermal infrared spectrum // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2007. – Vol. 29, no. 4.
3. L a m L., S e o n g - W h a n L e e, a n d C h i n g Y. S u e n. Thinning methodologies – A comprehensive survey // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14, no. 9. – P. 879.
4. И в а н и ц к и й Г. Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176. – № 12. – С. 1293–1320.
5. Г о н с а л е с Р., В у д с Р., Э д д и н с С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – С. 380.

6. Lin Hong, Yifei Wan, and Anil K. Jain. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1998. – Vol. 20, no. 8. – P. 777–789.

Статья поступила в редакцию 12.09.2011

Н. С. Баша — аспирантка кафедры “Системный анализ и управление” Международного университета природы, общества и человека “Дубна”. Инженер-программист ФГУП “Научно-исследовательский институт прикладной акустики”. Специализируется в области распознавания образов и обработки изображений.



N.S. Basha — post-graduate of “System Analysis and Control” department of the “Dubna” International University of Nature, Society and Man. Engineer-programmer of the Research Institute of Applied Acoustics (federal state unitary enterprise). Specializes in the field of pattern recognition and image processing.

Л. А. Шульга — канд. техн. наук, начальник лаборатории распознавания образов ФГУП “Научно-исследовательский институт прикладной акустики”. Автор более 50 научных работ и двух патентов в области распознавания образов, обработки изображений, методов интегральной геометрии.



L.A. Shul'ga — Ph. D. (Eng.), head of laboratory for pattern recognition of the Research Institute of Applied Acoustics (federal state unitary enterprise). Author of more than 50 publications and 2 patents in the field of pattern recognition, image processing, methods of integral geometry.