

Раздел I. Методы и алгоритмы обработки информации

УДК 004.932

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-6-14

Р.Р. Ибадов, С.Р. Ибадов, Д.Н. Катков, В.В. Воронин, В.П. Федосов**РАСПОЗНАВАНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ***

Актуальность развития биометрических технологий идентификации личности обусловлена увеличением числа объектов и потоков информации, которые необходимо защищать от несанкционированного доступа, а именно: криминалистика; системы контроля доступа; системы идентификации личности; системы электронной коммерции; информационная безопасность; учет рабочего времени и регистрация посетителей; системы голосования; проведение электронных платежей; аутентификация на Web-ресурсах; различные социальные проекты, где требуется идентификация людей; проекты гражданской идентификации (пересечение государственных границ, выдача виз на посещение страны) и т.д. В отличие от бумажных идентификаторов (паспорт, водительские права), пароля или персонального идентификационного номера (PIN), биометрические характеристики не могут быть забыты или потеряны, их трудно подделать и практически невозможно изменить. В статье рассмотрен метод восстановления папиллярных узоров отпечатка пальца, который позволяет повысить эффективность распознавания отпечатков пальцев в биометрических системах идентификации человека, путем восстановления поврежденных участков на изображениях отпечатков пальцев. Показана эффективность нового подхода на примерах деформированных отпечатков пальцев. Предметом исследования являются методы и алгоритмы обработки отпечатков пальцев. Объектом исследования является набор из тестовых изображений. Результаты исследований применимы для использования в различных областях, связанных с биометрической аутентификацией по отпечатку пальца для обеспечения точности распознавания и безопасности. В ходе решения поставленных научных задач, синтезированы уникальные алгоритмы, на основе которых разработано программное обеспечение распознавания отпечатков пальцев с целью быстрой идентификации человека.

Распознавание; идентификация; реконструкция; восстановление; отпечаток пальцев.

R.R. Ibadov, S.R. Ibadov, D.N. Katkov, V.V. Voronin, V.P. Fedosov**RECOGNITION AND RESTORATION OF FINGERPRINTS**

The relevance of development of personality identification biometric technologies is caused by increase in number of objects and information streams which need to be protected from illegal access, namely: criminalistics; access control systems; systems of identification of the personality; systems of electronic commerce; information security; accounting of working hours and registration of visitors; systems of vote; carrying out electronic payments; authentication on Web resources; different social projects where identification of people is required; projects of civil identification (intersection of frontiers, issue of visas on visit of the country), etc. Unlike paper identifiers (the passport, the driving license), the password or the personal identification number (PIN), biometric characteristics can't be forgotten or lost, it is difficult to forge them and it is almost impossible to change. The article examines the method of restoring papillary fingerprint patterns, which makes it possible to increase the efficiency of fingerprint recognition in biometric systems of human identification, by restoring the damaged areas on images of fingerprints. The effectiveness

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-57-53192.

of the new approach is shown on examples of deformed fingerprints. The subject of the study are methods and algorithms for processing fingerprints. The object of the study is a set of test images. The results of the research are applicable for use in various areas related to biometric fingerprint authentication to ensure recognition accuracy and safety. In the course of solving the scientific problems, unique algorithms will be synthesized, on the basis of which the software for fingerprint recognition with the purpose of quick identification of a person.

Recognition; identification; reconstruction; restoration; fingerprint.

Введение. В настоящее время распознавание отпечатков пальцев широко применяется не только в криминалистике (рис. 1). Большую популярность приобрели дактилоскопические считыватели отпечатков пальцев для идентификации пользователей в системах контроля и управления доступом. Основные компоненты такого считывателя: блок сканера, который отвечает за ввод изображения отпечатка пальца и его оцифровку. Блок выделения шаблона отпечатка из его оцифрованного изображения, а также блок сравнения двух шаблонов для проведения верификации [1–5].

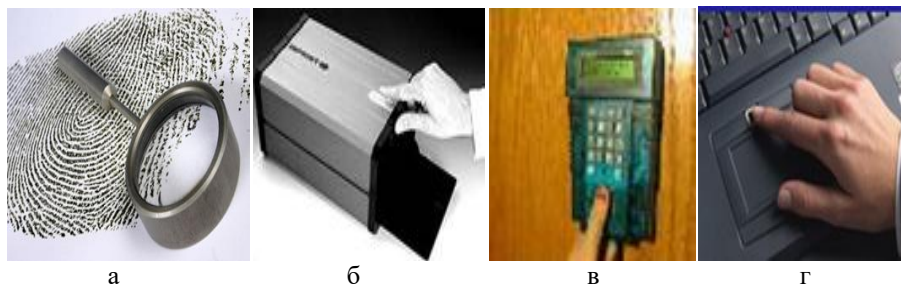


Рис. 1. Области использования отпечатков пальцев: а – криминалистика; б – система контроля доступа; в – система идентификации личности; г – информационная безопасность

Сканер включает в себя сенсор, который получает изображение отпечатка и аналогово-цифровой преобразователь. В качестве сенсоров в считывателях отпечатков пальца используются следующие типы: оптический сенсор, емкостный сенсор, тепловой сенсор, сенсор давления, ультразвуковой сенсор, радиочастотный сенсор [6–11].

За последние 5–10 лет характеристики распознавания отпечатков пальцев практически не изменились [12–16]. Алгоритм VeriFinger несколько лет выигрывал международное соревнование «International Fingerprint Verification Competition». К недостаткам данного алгоритма относится, то что папиллярный узор отпечатка пальца подвержен повреждениям мелкими царапинами и порезами. При использовании сканера на предприятиях с численностью персонала порядка нескольких сотен человек появляется высокая степень отказа сканирования при сканировании сухой или возрастной кожи.

Дактилоскопия, или метод идентификации человека по отпечаткам пальцев, является проверенным способом биометрической идентификации. В настоящее время эта технология занимает главенствующее место в криминалистике. На рис. 2 показана диаграмма распределения технологий идентификаторов. Можно видеть, что отпечатки пальцев занимают лидирующее положение.

Несмотря на многочисленные исследования в области дактилоскопии, проводимыми многочисленными учеными, точность дактилоскопической идентификации не достигла своего потенциала [17–24]. Основной причиной является сложность моделирования, учета и компенсации многочисленных искажающих факторов, среди которых следует выделить шумы, малые области пересечения предъявляемых к сравнению

отпечатков пальцев, эластичные деформации. Деформации являются одним из самых сильных и наименее изученных факторов. В этой связи тематика, связанная с исследованием деформаций отпечатков пальцев является актуальной [25].



Рис. 2. Распределение технологий идентификаторов

Цели и задачи. Целью исследования является повышение эффективности распознавания отпечатков пальцев в биометрических системах идентификации человека.

Задачи исследования:

- ◆ Разработать алгоритм обнаружения и восстановления дефектов на изображениях отпечатков пальцев.
- ◆ Провести анализ результатов предложенного метода.

Основная часть. Дефекты на изображении отпечатка пальца оказывают значительное влияние на результат работы алгоритмов, поэтому требуется этап предобработки изображения. Этап предобработки включает в себя перевод изображения в оттенки серого и сегментацию изображения. Сегментацией называют процедуру отделения фонового изображения от интересующего нас рисунка отпечатка пальца. Эта процедура необходима для правильной работы дальнейшего алгоритма нормализации. После этапа предобработки выполняется поиск поврежденных участков на изображении, для этого используются операции эрозия и размыкания. Далее к найденным поврежденным участкам изображения применяется алгоритм восстановления [26].

Алгоритм сегментации состоит из нескольких этапов. На первом этапе изображение делится на участки размером $W \times W$. В каждом участке вычисляется среднее значение яркости по всему участку:

$$M(k) = \frac{1}{W^2} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{W-1} I(i, j), \quad (1)$$

где $I(i, j)$ – значение цвета в пикселе с соответствующими координатами; $M(k)$ – среднее значение оттенка серого для сегмента k .

Затем вычисляется значение дисперсии для каждого участка. Для участка размером $W \times W$ пикселей дисперсия вычисляется как:

$$V(k) = \frac{1}{W^2} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{W-1} [I(i, j) - M(k)]^2, \quad (2)$$

где $V(k)$ – значение дисперсии для данного участка k .

Далее происходит сравнение величин $V(k)$ с заданным пороговым значением. Если значение дисперсии меньше, чем заданное пороговое значение, то участок будет считаться фоновой областью, и каждому пикселю в этом участке при-

сваивается значение яркости, соответствующее белому цвету, иначе, считается, что это часть основного изображения, и значения яркости в каждом пикселе участка становятся равными значениям яркости пикселей исходного изображения.

Алгоритм работает следующим образом: определяется количество участков на изображении по горизонтали и вертикали:

$$N_w = \frac{W}{Segm}, \quad (3)$$

$$N_h = \frac{H}{Segm}, \quad (4)$$

где W – ширина изображения, $Segm$ – размер участка, H – высота изображения.

Затем рассчитываются и сохраняются значения границ участка, средней яркости и дисперсии. Рассчитанные дисперсии участка сравниваются с заданным пороговым значением. Если дисперсия меньше порогового значения, то каждый пиксель участка заполняется белым цветом; если больше, то пиксели участка не меняются.

Следующим шагом является нормализация изображения, необходимая для установления значений интенсивности пикселей изображения способом регулировки интервала значений уровней серого так, чтобы они находились в пределах нужного диапазона значений. Такой способ позволяет равномерно распределить все цвета пикселей изображения в заданном интервале.

Под нормализацией понимается расчет значений средней яркости и дисперсии изображения всего изображения с последующим преобразованием:

$$N(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{V_0 \cdot (I(i, j) - M)^2}{V}}, & I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{V_0 \cdot (I(i, j) - M)^2}{V}}, & I(i, j) \leq M \end{cases} \quad (5)$$

где M и V – среднее значение яркости и дисперсия для пикселя исходного изображения $I(i, j)$; M_0 и V_0 – необходимые средние значение яркости и дисперсии, соответственно.

Нормализация не влияет на структуру папиллярных линий, и сохраняет всю уже имеющуюся в изображении информацию.

Блок-схема предлагаемого метода представлена на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема предлагаемого метода

После этапа предобработки выполняются операции эрозия и размыкания. При выполнении операции эрозии структурный элемент проходит по всем пикселям изображения. Если в некоторой позиции каждый единичный пиксел структурного элемента совпадает с единичным пикселом бинарного изображения, то выполняется логическое сложение центрального пиксела структурного элемента с соответствующим пикселом выходного изображения. В результате применения операции эрозии все объекты, меньшие чем структурный элемент, стираются, объекты, соединённые тонкими линиями, становятся разъединёнными и размеры всех объектов уменьшаются. Операция эрозии полезна для удаления малых объектов и различных шумов, но у этой операции есть недостаток – все остающиеся объекты уменьшаются в размере. Этого эффекта можно избежать, если после операции эрозии применить операцию размыкания с тем же структурным элементом. Размыкание отсеивает все объекты, меньшие, чем структурный элемент, но при этом помогает избежать сильного уменьшения размера объектов. Также размыкание идеально подходит для удаления линий, толщина которых меньше, чем диаметр структурного элемента. Также важно помнить, что после этой операции контуры объектов становятся более гладкими. К найденным поврежденным участкам изображения применяется алгоритм восстановления.

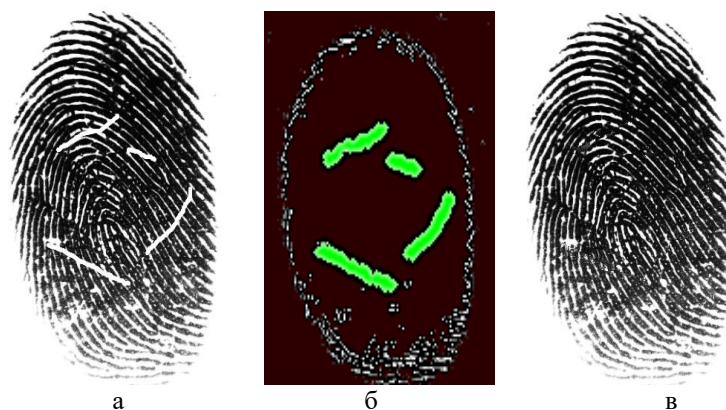


Рис. 4. Результат работы метода: а – исходное изображение; б – поиск и выделение дефектов на изображении; в – восстановленное изображение предложенным методом.

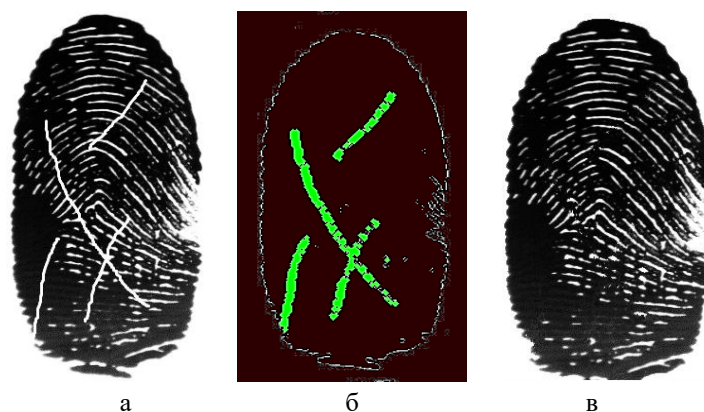


Рис. 5. Результат работы метода: а – исходное изображение; б – поиск и выделение дефектов на изображении; в – восстановленное изображение предложенным методом

Таблица 1

Основные характеристики предлагаемого метода в сравнении с другими методами

Название	Эффективность распознавания	Возможность восстановления деформированных отпечатков пальцев	Использование 3D отпечатков пальцев
Coarse	87,5 %	-	-
Conditional Selecting of Legendre/ Chebyshev (Tashk et al., 2009)	93,7 %	+	-
Legendre (Ram & Bischof, 2008; Tashk et al., 2009)	91,2 %	-	-
Chebyshev (Tashk et al., 2009)	92 %	-	-
Fourier Series (FS) (Hou et al., 2011);(Wang et al., 2007)	94 %	-	-
Structure Tensor (ST) (Hou et al., 2011; Rao & Schunck, 1989)	93 %	-	+
Предлагаемый метод	96 %	+	+

Следует отметить, что к достоинствам предлагаемого подхода стоит отнести более высокую вероятность распознавания и возможность обработки деформированных отпечатков и отпечатков, полученных 3D сенсорами. Так же стоит отметить что сравнение представлено с методами распознавания отпечатков пальцев, а не продуктами, так как во многих случаях информация о том какой алгоритм используется в том или ином продукте не доступна. Но здесь представлены основные методы, которые используются во всех программных продуктах.

Заключение. В работе представлен алгоритм обнаружения и восстановления дефектов на изображениях отпечатков пальцев. Представлены основные характеристики предлагаемого метода в сравнении с другими алгоритмами. Примеры, представленные в работе, демонстрируют эффективность алгоритма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кухарев Г.А.* Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека. – СПб.: Политехника, 2001. – 240 с.
2. *Гудков В.Ю.* Метод параллельных цепей для распознавания изображений отпечатков пальцев // Системы и средства информатики. – 2013. – Т. 23, №. 2. – С. 35-49.
3. *Самищенко С.С.* Атлас необычных папиллярных узоров. – М.: Юриспруденция, 2001. – 307 с.
4. *Насонов А.В., Крылов А.С., Урмаев О.С.* Применение метода суперразрешения для биометрических задач распознавания лиц в видеопотоке // Системы высокой доступности. – 2009. – Т. 1. – С. 26-34.
5. *Урмаев О.С.* Адаптация биометрической системы к искажающим факторам на примере дактилоскопической идентификации // Информатика и её применения. – 2009. – Т. 3, №. 2. – С. 25-33.
6. *Burr D.J.* A dynamic model for image registration // Computer Graphics and Image Processing. – 1981. – Vol. 15, No. 2. – P. 102-112.
7. *Bazen A.M., Gerez S.H.* Fingerprint matching by thin-plate spline modelling of elastic deformations // Pattern Recognition. – 2003. – Vol. 36, No. 8. – P. 1859-1867.

8. *Bookstein F.L.* Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1989. – Vol. 11, No. 6. – P. 567-585.
9. *Cappelli R., Maio D., Maltoni D.* Modelling plastic distortion in fingerprint images // International Conference on Advances in Pattern Recognition. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. – C. 371-378.
10. *Chikkerur S., Cartwright A.N., Govindaraju V.* Fingerprint enhancement using STFT analysis // Pattern recognition. – 2007. – Vol. 40, No. 1. – P. 198-211.
11. Пат. 5291560 США. 1994. Biometric personal identification system based on iris analysis / *Daugman J.G.*
12. *Gudkov V.Y.* Mathematical models of fingerprint image on the basis of lines description // Proc. of the 19th International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon'2009). – 2009. – P. 223-227.
13. *Eleccion M.* Automatic fingerprint identification // IEEE spectrum. – 1973. – Vol. 10, No. 9. – P. 36-45.
14. *Jain A.K. et al.* Filterbank-based fingerprint matching // IEEE transactions on Image Processing. – 2000. – Vol. 9, No. 5. – P. 846-859.
15. *Jain L. C. et al. (ed.)*. Intelligent biometric techniques in fingerprint and face recognition. – CRC press, 1999. – Vol. 10.
16. *Kass M., Witkin A.* Analyzing oriented patterns // Readings in Computer Vision. – 1987. – P. 268-276.
17. *Maio D. et al.* FVC2000: Fingerprint verification competition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2002. – Vol. 24, No. 3. – P. 402-412.
18. *Maio D. et al.* FVC2004: Third fingerprint verification competition // Biometric Authentication. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – C. 1-7.
19. *Liang X., Asano T., Zhang H.* A combined radial basis function model for fingerprint distortion // International Conference Image Analysis and Recognition. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. – C. 286-296.
20. *Ratha N.K., Chen S., Jain A.K.* Adaptive flow orientation-based feature extraction in fingerprint images // Pattern Recognition. – 1995. – Vol. 28, No. 11. – P. 1657-1672.
21. *Fornet M., Rohr K., Stiehl H.S.* Radial basis functions with compact support for elastic registration of medical images // Image and vision computing. – 2001. – Vol. 19, No. 1-2. – P. 87-96.
22. *Ross A., Dass S.C., Jain A.K.* Fingerprint warping using ridge curve correspondences // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – Vol. 28, No. 1. – P. 19-30.
23. *Novikov S.O., Glushchenko G.N.* Fingerprint ridge structure generation models // Sixth International Workshop on Digital Image Processing and Computer Graphics: Applications in Humanities and Natural Sciences. – International Society for Optics and Photonics, 1998. – Vol. 3346. – P. 270-275.
24. *Watson C.I., Watson C.I.* NIST Special Database 29: Plain and Rolled Images from Paired Fingerprint Cards. – US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2001.
25. *Ибадов Р.Р., Федосов В.П., Ибадов С.Р.* Распознавание отпечатков пальцев в биометрических системах идентификации человека // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация связь». Т. 2. – Воронеж, 2018. – С. 22-25.
26. *Ибадов Р.Р., Ибадов С.Р., Воронин В.В., Федосов В.П.* Модифицированный метод реконструкции изображений на основе поиска подобных областей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – №. 6 (191). – С. 179-189.

REFERENCES

1. *Kukharev G.A.* Biometricheskie sistemy: Metody i sredstva identifikatsii lichnosti cheloveka [Biometric systems: Methods and means of identification of a person]. Saint Petersburg: Politehnika, 2001, 240 p.
2. *Gudkov V.Yu.* Metod parallel'nykh tsepey dlya raspoznavaniya izobrazheniy otpechatkov pal'tsev [The method of parallel circuits for image recognition of fingerprints], *Sistemy i sredstva informatiki* [Systems and means of Informatics], 2013, Vol. 23, No. 2, pp. 35-49.

3. *Samishchenko S.S.* Atlas neobychnykh papillyarnykh uzorov [Atlas of unusual papillary patterns]. Moscow: Yurisprudentsiya, 2001, 307 p.
4. *Nasonov A.V., Krylov A.S., Ushmaev O.S.* Primenenie metoda superrazresheniya dlya biometricheskikh zadach raspoznavaniya lits v videopotoke [Application of the superresolution method for biometric facial recognition tasks in the video stream], *Sistemy vysokoy dostupnosti* [High availability systems], 2009, Vol. 1, pp. 26-34.
5. *Ushmaev O.S.* Adaptatsiya biometricheskoy sistemy k iskazhayushchim faktoram na primere daktiloskopicheskoy identifikatsii [Adaptation of biometric system to distorting factors on the example of fingerprint identification], *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and its application], 2009, Vol. 3, No. 2, pp. 25-33.
6. *Burr D.J.* A dynamic model for image registration, *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, Vol. 15, No. 2, pp. 102-112.
7. *Bazen A.M., Gerez S.H.* Fingerprint matching by thin-plate spline modelling of elastic deformations, *Pattern Recognition*, 2003, Vol. 36, No. 8, pp. 1859-1867.
8. *Bookstein F.L.* Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1989, Vol. 11, No. 6, pp. 567-585.
9. *Cappelli R., Maio D., Maltoni D.* Modelling plastic distortion in fingerprint images, *International Conference on Advances in Pattern Recognition*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, pp. 371-378.
10. *Chikkerur S., Cartwright A.N., Govindaraju V.* Fingerprint enhancement using STFT analysis, *Pattern recognition*, 2007, Vol. 40, No. 1, pp. 198-211.
11. *Daugman J.G.* Biometric personal identification system based on iris analysis. Patent 5291560 CIIA. 1994.
12. *Gudkov V.Y.* Mathematical models of fingerprint image on the basis of lines description, *Proc. of the 19th International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon'2009)*, 2009, pp. 223-227.
13. *Eleccion M.* Automatic fingerprint identification, *IEEE spectrum*, 1973, Vol. 10, No. 9, pp. 36-45.
14. *Jain A.K. et al.* Filterbank-based fingerprint matching, *IEEE transactions on Image Processing*, 2000, Vol. 9, No. 5, pp. 846-859.
15. *Jain L.C. et al.* (ed.). Intelligent biometric techniques in fingerprint and face recognition. CRC press, 1999, Vol. 10.
16. *Kass M., Witkin A.* Analyzing oriented patterns, *Readings in Computer Vision*, 1987, pp. 268-276.
17. *Maio D. et al.* FVC2000: Fingerprint verification competition, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, Vol. 24, No. 3, pp. 402-412.
18. *Maio D. et al.* FVC2004: Third fingerprint verification competition, *Biometric Authentication*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 1-7.
19. *Liang X., Asano T., Zhang H.* A combined radial basis function model for fingerprint distortion, *International Conference Image Analysis and Recognition*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, pp. 286-296.
20. *Ratha N.K., Chen S., Jain A.K.* Adaptive flow orientation-based feature extraction in fingerprint images, *Pattern Recognition*, 1995, Vol. 28, No. 11, pp. 1657-1672.
21. *Fornefett M., Rohr K., Stiehl H.S.* Radial basis functions with compact support for elastic registration of medical images, *Image and vision computing*, 2001, Vol. 19, No. 1-2, pp. 87-96.
22. *Ross A., Dass S.C., Jain A.K.* Fingerprint warping using ridge curve correspondences, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, Vol. 28, No. 1, pp. 19-30.
23. *Novikov S.O., Glushchenko G.N.* Fingerprint ridge structure generation models, *Sixth International Workshop on Digital Image Processing and Computer Graphics: Applications in Humanities and Natural Sciences*. International Society for Optics and Photonics, 1998, Vol. 3346, pp. 270-275.
24. *Watson C.I., Watson C.I.* NIST Special Database 29: Plain and Rolled Images from Paired Fingerprint Cards. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2001.
25. *Ibadov R.R., Fedosov V.P., Ibadov S.R.* Raspoznavanie otpechatkov pal'tsev v biometricheskikh sistemakh identifikatsii cheloveka [Fingerprint recognition in biometric systems of human identification], *Sbornik trudov XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya svyaz'»* [Proceedings of the XXIV International scientific and technical conference "Radiolocation, navigation communication"]. Vol. 2. Voronezh, 2018, pp. 22-25.

