

# МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ БИОАКУСТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ МНОГОФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ

Частикова В. А.<sup>1</sup>, Гуляй В. Г.<sup>2</sup>

DOI: 10.21681/2311-3456-2025-6-116-126

**Цель исследования:** теоретическое обоснование и разработка метода распознавания личности на основе биоакустического сканирования с целью реализации процесса многофакторной аутентификации в рамках одного локального устройства, а также минимизации ошибок I и II рода в многофакторных системах аутентификации.

**Методы исследования:** применены методы волновой теории физики, включающие аспекты распространения ультразвуковых волн и их взаимодействие с биологическим тканями. Также использованы статистические методы для оценки гипотез и алгоритмы машинного обучения в виде генеративно-сопоставительных нейронных сетей.

**Научная новизна:** разработан новый метод распознавания личности по данным биоакустического сканирования, характеризующим геометрию кости дистальной фаланги пальца и соотношение мягких тканей пальца. Предложенный биоакустический способ сканирования дистальной фаланги пальца, в отличие от ультразвукового сканирования папиллярного узора, работает на более низких частотах (15–17 МГц) и позволяет фиксировать уникальные характеристики не только кожного покрова, но и более глубоких тканей пальца. Геометрия кости дистальной фаланги, как и соотношение мягких тканей пальца, ранее не применялась в качестве аутентификационной характеристики личности.

**Результат и практическая значимость:** обоснован метод аутентификации личности путем биоакустического сканирования пальца, в рамках которого фиксируется геометрия кости дистальной фаланги пальца руки, включая выступы, выемки, гребешки и ногтевую бугристость, являющиеся уникальными для каждого человека, и взаимное расположение мягких тканей подушечки пальца с учетом их взаимного соотношения по объему. Практическая значимость предлагаемого способа обусловлена тем, что данный подход менее уязвим к подделкам и, соответственно, атакам с помощью муляжей, так как биометрические характеристики скрыты от глаз злоумышленника, в отличие от геометрии лица и изображения радужки глаза на фотографиях в открытом доступе, оставляемых на различных поверхностях отпечатков пальцев и т.д. Кроме того, подобный подход позволяет реализовать систему, осуществляющую процесс многофакторной аутентификации в рамках одного локального устройства (дактилоскопического сканера) с минимальным количеством каналов передачи данных.

**Ключевые слова:** аутентификация, ошибка I рода, ошибка II рода, отпечаток пальца, генеративно-сопоставительная нейронная сеть, спуфинг-атака, биометрический сканер, биоакустика.

## Введение

В условиях активного развития цифровых технологий наблюдается рост количества киберугроз, включая фишинг, компрометацию учетных данных и атаки на системы аутентификации. Традиционные методы подтверждения личности, основанные на паролях и одноразовых кодах, не могут противостоять современным кибератакам.

В связи с этим особую роль в информационной безопасности играют методы аутентификации, базирующиеся на распознавании биометрических характеристик личности. Внедрение таких систем способно существенно повысить уровень защиты конфиденциальных данных и критически важных информационных систем, минимизируя риски несанкционированного доступа.

### 1. Распознавание личности по отпечатку пальца

Одним из самых распространенных способов распознавания личности является аутентификация

по отпечатку пальца [5]. Технология распознавания отпечатков пальцев анализирует уникальный рисунок папиллярных линий, уделяя особое внимание так называемым минуциям – точкам разветвления и окончания гребней.

Современные сканеры используют различные физические принципы [5, 15]: оптические системы фиксируют нарушение полного внутреннего отражения, емкостные датчики измеряют разницу в электрической емкости, а ультразвуковые сканеры анализируют отражение звуковых волн.

Аутентификация по отпечаткам пальцев представляет собой оптимальное сочетание надежности, удобства и доступности. В отличие от способов сканирования сетчатки глаза, она не требует дорогостоящего оборудования и сложных процедур идентификации [12]. По сравнению с распознаванием лица дактилоскопический метод обеспечивает значительно

1 Частикова Вера Аркадьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры кибербезопасности и защиты информации КубГТУ, г. Краснодар, Россия. E-mail: chastikova\_va@mail.ru

2 Гуляй Виктория Геннадьевна, студент института компьютерных систем и информационной безопасности КубГТУ, г. Краснодар, Россия. E-mail: ms.gulyay@bk.ru

более высокий уровень безопасности и не зависит от изменяющихся внешних факторов [15]. Однако все биометрические системы аутентификации личности, включая сканеры отпечатков пальца, подвержены возникновению ошибок I и II рода [7].

## 2. Ошибки I и II рода

В теории математической статистики проверки гипотез ошибки первого и второго рода отражают вероятности ошибочных решений [11] при принятии или отклонении нулевой гипотезы  $H_0$ . Ошибка первого рода ( $\alpha$ ) возникает, когда нулевая гипотеза  $H_0$  отвергается, несмотря на ее истинность:

$$\alpha = P(H_1 / H_0), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – вероятность ошибки первого рода,  $H_0$  – нулевая гипотеза,  $H_1$  – альтернативная гипотеза.

Данная ошибка также называется ложноположительным решением (false positive), а ее вероятность контролируется уровнем значимости теста.

Ошибка второго рода ( $\beta$ ) представляет собой противоположную ситуацию, при которой альтернативная гипотеза  $H_1$  не отвергается, несмотря на ее ложность:

$$\beta = P(H_0 / H_1), \quad (2)$$

где  $\beta$  – вероятность ошибки второго рода,  $H_0$  – нулевая гипотеза,  $H_1$  – альтернативная гипотеза.

Это ложноотрицательное решение (false negative), и его вероятность связана с мощностью критерия ( $1 - \beta$ ).

Важно отметить, что между  $\alpha$  и  $\beta$  существует обратная зависимость: уменьшение вероятности одной ошибки, как правило, ведет к увеличению вероятности другой при фиксированном объеме выборки.

В контексте биометрических систем аутентификации, в том числе систем дактилоскопического сканирования, ошибки первого и второго рода приобретают специфическую интерпретацию, связанную с безопасностью и удобством пользователей.

Ошибка первого рода обозначается как False Rejection Rate (FRR) и характеризует вероятность того, что система не распознает зарегистрированного пользователя, ошибочно отвергая его попытку аутентификации. Высокий FRR снижает удобство эксплуатации системы, поскольку легитимные пользователи сталкиваются с неоправданными отказами в доступе.

Ошибка второго рода, именуемая False Acceptance Rate (FAR), представляет более серьезную угрозу, так как отражает вероятность ошибочного предоставления доступа постороннему лицу. В системах с высокими требованиями к безопасности, таких как банковские приложения или защищенные

правительственные объекты, минимизация FAR является критически важной задачей.

Однако снижение FAR неизбежно приводит к увеличению FRR, что требует поиска оптимального баланса между безопасностью и удобством использования подобных систем.

## 3. Спуфинг-атаки с применением генеративного искусственного интеллекта (ИИ)

Наравне с развивающимися технологиями защиты прогрессируют и способы атак на системы биометрической аутентификации. Так в работе [2] приводится способ реализации спуфинг-атаки путем генерации рисунка отпечатка пальца.

Данный метод атаки на системы биометрической аутентификации становится возможным благодаря тому, что сканеры отпечатка пальца, независимо от их типа, фиксируют в качестве биометрического шаблона не весь папиллярный узор отпечатка, а только набор опорных точек – минуций, которые представляют собой уникальные особенности рельефа кожи в виде окончаний, разветвлений или изгибов папиллярных линий (рис. 1).



Детали папиллярного узора:

1 – фрагмент, 2 – начало линии, 3 – глазок, 4 – расхождение линий, 5 – крючок, 6 – мостик, 7 – островок, 8 – точка, 9 – окончание линии, 10 – слияние линий

Рис. 1. Минуции папиллярного узора

Минуции являются ключевыми элементами аутентификационной информации, поскольку их взаимное расположение и количество формируют индивидуальный паттерн, устойчивый к изменениям в течение жизни человека. Современные алгоритмы обработки изображений преобразуют эти точки в цифровые шаблоны, позволяя осуществлять быструю и точную верификацию личности при сравнительно небольшом объеме обрабатываемых данных.

Однако алгоритм, описанный в [2], позволяет реализовывать потенциальные угрозы безопасности, связанные с использованием частичных отпечатков пальцев в системах аутентификации, таких как смартфоны и другие мобильные устройства. Из-за небольших размеров датчиков пользователи регистрируют несколько частичных отпечатков (рис. 2),

что повышает удобство, но снижает безопасность: система принимает любой из сохранённых шаблонов.



Рис. 2. Пример частичных отпечатков [2]

Авторы предлагают метод генерации «мастер-отпечатков» — шаблонов, совпадающих с множеством реальных отпечатков. Вероятность их обнаружения выше в частичных данных из-за снижения энтропии и роста частоты ложных совпадений (FAR).

Эксперименты на наборах FVC2002 DB1-A (отпечатки, полученные с оптических датчиков) и FingerPass DB7 (отпечатки, полученные с ёмкостных датчиков) показали, что мастер-отпечатки совпадают с 4–12 % шаблонов. Например, при FMR 0,1 % один шаблон совпал с 1,4 % частичных отпечатков (10,6 % пользователей). Использование пяти мастер-отпечатков позволило атаковать до 26,5 % (ёмкостные датчики) и 65,2 % (оптические датчики) пользователей за 5 попыток.

Исследование подтверждает уязвимость систем с частичными отпечатками к атакам по словарю, особенно при увеличении числа регистрируемых шаблонов. Даже при низком FAR (0,01 %) риск сохраняется, что требует пересмотра подходов к проектированию биометрических систем.

В статье [3] приводится усовершенствованный метод DeepMasterPrint, который представляет собой доработанный подход к генерации синтетических изображений отпечатков пальцев (рис. 3). В отличие от предыдущих разработок, ограничивавшихся созданием шаблонов минуций, данный метод работает

с полноценными изображениями, что значительно расширяет его практическую применимость. Основу технологии составляет комбинация генеративно-состязательных сетей и эволюционной оптимизации, позволяющая создавать высокоэффективные мастер-отпечатки.

Процесс создания мастер-отпечатков DeepMasterPrint начинается с обучения генеративно-состязательной сети Вассерштайна на реальных изображениях отпечатков пальцев, где генератор постепенно учится создавать визуально достоверные образцы. Особенность подхода заключается в последующем применении стратегии эволюционной оптимизации CMA-ES, которая целенаправленно ищет такие значения скрытых параметров генератора, при которых создаваемые изображения будут максимально часто совпадать с различными отпечатками из базы данных.

Практические испытания метода продемонстрировали его результативность. При стандартных настройках безопасности (FMR 1 %) один сгенерированный DeepMasterPrint способен успешно имитировать до 77 % отпечатков в тестовой выборке. Важно отметить, что технология сохраняет эффективность при работе с различными системами верификации, включая VeriFinger, Bozorth3 и Innovatrics, что подчеркивает ее универсальность.

Данный способ позволяет осуществлять атаки как на канал передачи данных на сервер обработки, так и непосредственно через считывающую поверхность сканеров, так как данный способ работает на уровне изображений, в отличие от своего предшественника, базирующегося на генерации минуций.

В связи с возрастающими возможностями злоумышленников в виде развития генеративного искусственного интеллекта увеличивается и вероятность реализации подобного рода атак [9].

#### 4. Способы предотвращения спуфинг-атак в дактилоскопических сканерах

Основным способом предотвращения возникновения ошибок II рода является внедрение систем многофакторной аутентификации (МФА) [6]. Однако



Реальные отпечатки пальцев

Сгенерированные отпечатки пальцев

Рис. 3. Результат работы алгоритма DeepMasterPrint, генерирующего папиллярные узоры отпечатков пальца [3]



несмотря на повышенную надежность по сравнению с однофакторными методами, внедрение МФА сопряжено с рядом уязвимостей, наиболее критичными из которых являются риски, связанные с увеличением числа каналов передачи аутентификационных данных. Основная проблема заключается в том, что каждый дополнительный фактор аутентификации формирует новый канал коммуникации, потенциально подверженный атакам.

Более того, интеграция разнородных технологий верификации приводит к усложнению архитектуры системы, что увеличивает вероятность ошибок конфигурации и создает дополнительные векторы для эксплуатации уязвимостей. Например, несогласованность политик безопасности между разными модулями аутентификации может позволить злоумышленнику обойти один из факторов, используя слабое звено в цепочке проверки.

Таким образом, несмотря на теоретическое повышение уровня защиты, многофакторные системы могут демонстрировать сниженную эффективность в реальных условиях из-за уязвимостей в дополнительных каналах передачи данных. В связи с этим возникает необходимость создания системы, реализующей процесс многофакторной аутентификации в рамках одного локального устройства с минимальным количеством каналов передачи данных. В случае применения систем аутентификации по отпечатку пальца необходимо фиксировать дополнительные биометрические характеристики личности в рамках дактилоскопического сканера. Это становится возможным, так как помимо папиллярного узора палец руки обладает и другими не менее уникальными характеристиками – геометрией кости, соотношением различных мягких тканей и другими [1, 13].

## 5. Обоснование способа биоакустического сканирования

### 5.1. Геометрия кости

Каждый из пяти пальцев руки человека состоит из отдельных подвижных частей – фаланг, которые представляют собой небольшие трубчатые кости. Как часть скелета человека, палец состоит из трех сегментов: проксимального, среднего и дистального.

Геометрия каждого из этих сегментов определяется рядом особенностей, таких как форма, размер, углы и длина кости.

Современные исследования подтверждают, что каждая кость фаланги пальца обладает уникальными анатомическими особенностями – наличием выступов, борозд, ямок и других элементов, которые делают их различимыми от тех же костей других людей. С возрастом в костной ткани происходят изменения, такие как снижение плотности и минерализации, однако эти процессы не влияют на эффективность аутентификации, т.к. их можно предусмотреть заранее и учесть в ходе обучения системы распознавания личности с перспективой анализа данных в течении длительного промежутка времени (более 5 лет).

Исследования [7, 21] доказывают, что с ростом плотности губчатой костной ткани влияние минерального содержания на растягивающие напряжения и деформации снижается, тогда как его воздействие на сжимающие напряжения, напротив, усиливается. Учет этих данных в самообучающихся системах распознавания личности позволит проводить высокоточную аутентификацию личности на протяжении всей жизни человека.

### 5.2. Мягкие ткани

Палец человека представляет собой сложную биомеханическую систему, состоящую из множества взаимосвязанных тканей, каждая из которых выполняет уникальную и жизненно важную функцию. Разнообразие мягких тканей пальца руки представлено на рисунке 4.

Бондаренко И. Н. было проведено исследование мягких тканей пальцев рук [4] среди 63 испытуемых в возрасте от 22 до 59 лет на аппарате экспертного класса MyLabTwice (Esaote, Италия) с линейным датчиком SL3116 на частотном диапазоне 10–22 МГц в В-режиме, режиме цветового доплеровского картирования (ЦДК) и режиме microV, на гелевой подушке, в стандартных точках при одинаковых настройках аппарата. Исследование показало, что с возрастом средняя толщина мягких тканей, в т.ч. кожных

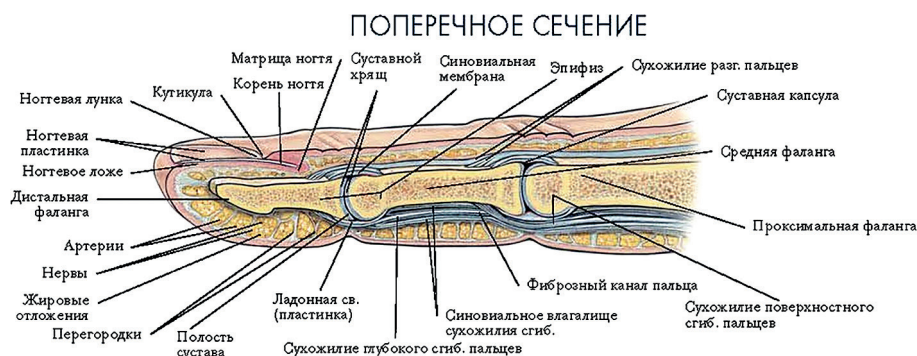


Рис. 4. Разнообразие тканей в продольном сечении пальца руки

покровов, уменьшается, однако данный показатель является весьма индивидуальным и зависит от возрастной группы только в усредненном значении [22]. Аналогично и другие параметры мягких тканей, такие как их плотность, являются индивидуальными, а следовательно, могут использоваться в верификационных целях.

Аутентификация по одному из параметров мягких тканей не будет однозначно определять личность пользователя. Но совокупность таких параметров может достаточно однозначно подтверждать личность человека.

### 5.3. Сравнительный анализ различных тканей пальца

Как уже было сказано выше, палец руки обладает большим разнообразием тканей, которые различаются по плотности, структуре, функции и механическим свойствам. В таблице 1 отражены такие характеристики тканей, как плотность, прочность и эластичность.

Различия в структуре тканей, представленные в таблице 1, лучше всего видны при ультразвуковом сканировании, так как скорость и отражение ультразвуковых волн напрямую зависят от плотности и упругости ткани. Кость, мышцы, жир и сосуды по-разному проводят и рассеивают ультразвук, создавая четкую картину внутреннего строения пальца, позволяющую проводить биоакустическую аутентификацию личности.

### 5.4. Особенности распространения ультразвука в тканях

Ультразвуковые волны обладают уникальными свойствами, которые зависят от характеристик среды [16]. Скорость распространения ультразвука определяется плотностью и упругостью среды, а также внутренней кинетической энергией молекул. Совокупность данных параметров влияет на то, как быстро волна может распространяться в различных структурах.

В однородных изотропных средах распространение ультразвуковых волн подчиняется волновому уравнению (3)

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

где  $p$  – акустическое давление,  $c$  – скорость звука в среде.

Скорость распространения определяется плотностью и коэффициентом упругости среды (4)

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (4)$$

где  $K$  – коэффициент упругости среды,  $\rho$  – плотность среды.

В жидкостях и газах УЗ-волны являются исключительно продольными, тогда как в твёрдых телах возможно возникновение поперечных и поверхностных волн.

Ультразвуковые волны способны отражаться, преломляться и рассеиваться на границах сред с разными акустическими свойствами, что позволяет с высокой точностью идентифицировать те или иные анатомические особенности строения пальца субъекта данных.

Отражение ультразвуковых волн представляет собой явление, при котором часть энергии ультразвуковой волны возвращается в исходную среду при её падении на границу раздела с другой средой, обладающей иным акустическим импедансом (5)

$$Z = \rho c, \quad (5)$$

где  $Z$  – акустический импеданс,  $\rho$  – плотность среды,  $c$  – скорость звука в среде.

Коэффициент отражения  $R$  зависит от соотношения импедансов сред и подчиняется закону сохранения энергии (6)

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad (6)$$

Таблица 1.

Сравнительный анализ структуры различных тканей пальца

Ткань	Плотность	Прочность	Эластичность
Кость	очень высокая	очень высокая	низкая
Сухожилия	высокая	очень высокая	низкая
Связки	средне-высокая	Высокая	умеренная
Хрящи	средняя	Средняя	высокая
Кожа (эпидермис)	умеренная	Средняя	средняя
Мышцы (скелетные)	умеренная	Средняя	высокая
Нервы	низкая	Низкая	средняя
Кровеносные сосуды	низкая	Низкая	высокая
Жировая ткань	очень низкая	очень низкая	высокая

где  $Z_1$  и  $Z_2$  — акустические импедансы первой и второй сред соответственно.

Преломление ультразвуковых волн возникает при изменении скорости их распространения на границе сред. Угол преломления связан с углом падения и скоростями звука в соответствующих средах законом Снеллиуса (7)

$$\frac{\sin\theta_1}{c_1} = \frac{\sin\theta_2}{c_2}, \quad (7)$$

где  $\theta_1$  — угол падения,  $\theta_2$  — угол преломления;  $c_1$ ,  $c_2$  — скорости распространения волн в среде.

Критический угол полного внутреннего отражения достигается при условии  $\theta_2 = 90^\circ$ .

Рассеивание ультразвуковых волн обусловлено наличием неоднородностей в среде, таких как частицы, пузырьки газа или границы зёрен в поликристаллических материалах. Интенсивность рассеянного сигнала зависит от соотношения длины волны ( $\lambda$ ) и размера неоднородностей ( $d$ ):

- Рэлеевское рассеяние наблюдается при  $d < \lambda$  (объекты малы по сравнению с длиной волны) и характеризуется зависимостью интенсивности от  $\lambda^{-4}$ ;
- Диффузное рассеяние возникает при  $d \sim \lambda$  (соизмеримы  $d$  с длиной волны неоднородности) и имеет сложную зависимость от микроструктуры среды.

Интенсивность рассеянного излучения определяется по формуле (8):

$$I_s \approx \frac{d^6}{\lambda^4}, \quad (8)$$

где  $I_s$  — интенсивность рассеянной волны,  $d$  — размер рассеивающего объекта,  $\lambda$  — длина ультразвуковой волны.

Затухание ультразвуковых волн проявляется в виде уменьшения амплитуды и энергии волны по мере её

распространения в среде, вызванное поглощением (диссипацией энергии в тепло) и рассеянием (изменением направления распространения части энергии). Затухание описывается экспоненциальной зависимостью и характеризуется суммарным коэффициентом затухания (9)

$$\alpha_{\text{общ}} = \alpha + \mu_s, \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{общ}}$  — суммарный коэффициент затухания,  $\alpha$  — коэффициент поглощения,  $\mu_s$  — коэффициент рассеяния.

Экспоненциальный закон затухания представлен формулой (10)

$$I(x) = -I_0 e^{-\alpha_{\text{общ}} x}, \quad (10)$$

где  $I(x)$  — интенсивность волны на расстоянии  $x$ ,  $I_0$  — начальная интенсивность,  $\alpha_{\text{общ}}$  — суммарный коэффициент затухания.

Затухание ультразвуковых волн обусловлено множеством факторов, включая плотность, упругость, вязкость среды, наличие и размер частиц, а также рассеяние и поглощение звука. Эти эффекты особенно заметны в газах и жидкостях из-за их молекулярной структуры и плотности [17].

Описанные выше эффекты, возникающие в ходе распространения ультразвуковых волн, позволяют формализовать поставленную задачу и создать математическую модель системы регистрации биометрических характеристик пальца человека на основе ультразвукового сканирования.

### 5.5. Отображение различных тканей пальца при ультразвуковом сканировании

В ходе ультразвукового сканирования ткани классифицируются по степени эхогенности, отражающей их способность к взаимодействию с ультразвуковыми волнами (рис. 6).

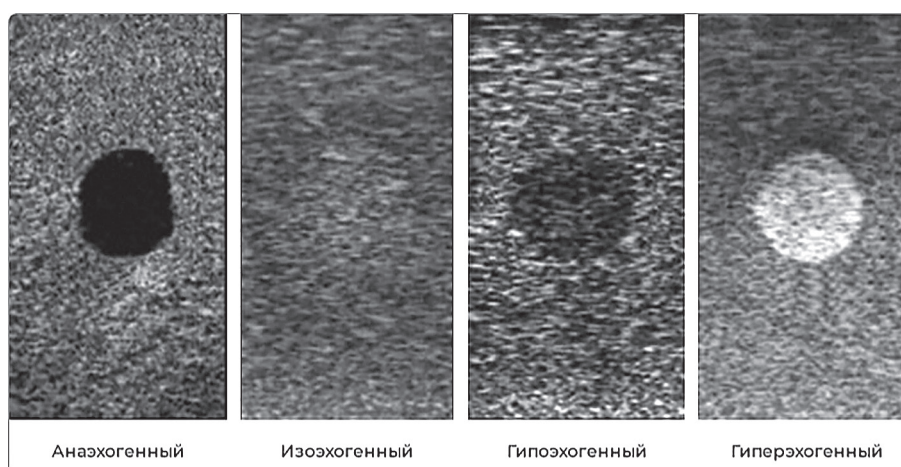


Рис. 6. Степени эхогенности различных структур здоровых тканей



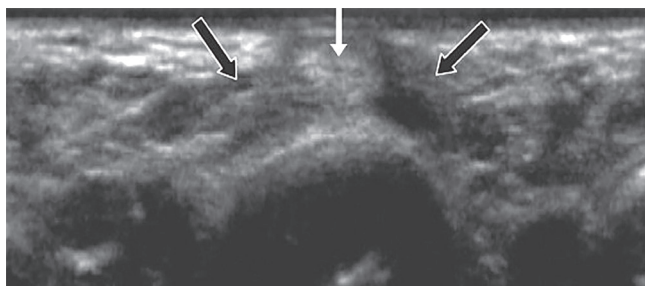


Рис. 7. Сухожилие разгибателя пальца (светлая стрелка) и коллатеральные связки (темные стрелки)

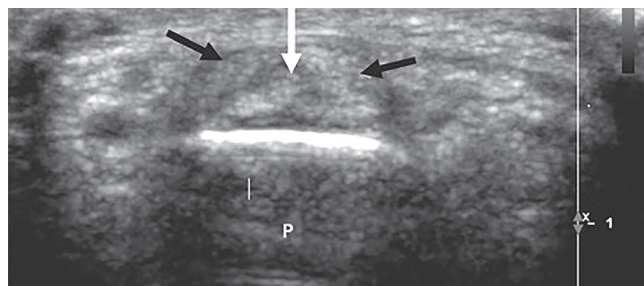


Рис. 8. Зона разделения сухожилия в поперечном сечении

По степени эхогенности выделяют следующие типы структур:

1. Анэхогенные зоны полностью лишены способности отражать ультразвук, что проявляется абсолютно чёрным изображением. Данная характеристика типична для жидкостных образований, включая кровеносные сосуды.
2. Изоэхогенные образования демонстрируют акустические свойства, сопоставимые с окружающими тканями, отображаясь на эхограммах в виде участков средней серой интенсивности. Характерным примером таких структур является мышечная ткань.
3. Гипоэхогенные структуры характеризуются пониженной акустической плотностью, что приводит к слабому отражению ультразвука, их визуальное отображение представляет собой тёмно-серые участки. К этой категории относятся, например, связки.
4. Гиперэхогенные структуры отличаются высокой акустической плотностью, что проявляется интенсивным отражением ультразвуковых волн. На эхограммах они визуализируются как яркие, приближающиеся к белому цвету, сигналы. Типичными представителями данной группы являются сухожилия и кортикальный слой костей.
5. Гетерогенные структуры представляют особый диагностический интерес, поскольку их неоднородная эхогенность, проявляющаяся сочетанием участков различной акустической плотности, часто свидетельствует о патологических процессах.

Ультразвуковое сканирование мягкотканых структур пальца руки, включая сухожилия, нервы и связочный аппарат, является высокоинформативным [18] и безопасным [10] методом благодаря использованию современных мультисекторных линейных датчиков с диапазоном частот от 7 до 17 МГц, что обеспечивает высокое пространственное разрешение.

Современные ультразвуковые технологии демонстрируют высокую разрешающую способность [19], достигающую 0,2–0,3 мм. Наибольший интерес представляют крестообразные связки сухожилий толщиной

0,2–0,4 мм и коллатеральные связки размером 0,3–0,6 мм, которые четко дифференцируются при ультразвуковом исследовании (рис. 7).

При проведении поперечного сканирования дистальных фаланг пальцев наблюдается характерная эхографическая картина с четким разграничением тканевых структур – сухожилия визуализируются как гиперэхогенные линейные, в то время как связочный аппарат определяется как гипоэхогенные образования (рис. 8).

Продольное сканирование позволяет детально оценить анатомию сухожильно-связочного комплекса. Четко дифференцируются сухожилия сгибателей толщиной 1,2–2,5 мм с сохраненной фибриллярной структурой, система кольцевидных связок (0,3–0,6 мм), а также блок связок A2, являющийся важным анатомическим ориентиром на уровне проксимальной фаланги. Особое внимание заслуживает зона разделения сухожилия поверхностного сгибателя, где отчетливо прослеживаются две расходящиеся ножки гиперэхогенной структуры и расположенное между ними сухожилие глубокого сгибателя. Наиболее тонкими визуализируемыми элементами являются крестообразные связки сухожилий (0,2–0,4 мм). При проведении поперечного ультразвукового сканирования дистальных фаланг пальцев кисти определяется характерная эхографическая картина, представленная двумя дифференцированными структурными компонентами с различными акустическими свойствами (рис. 9).

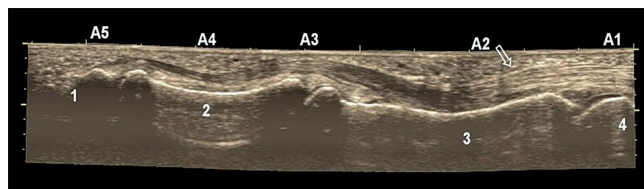


Рис. 9. Результат сканирования пальца в продольном сечении

Представленные образцы ультразвукового исследования демонстрируют возможные результаты биоакустического сканирования. Многообразие тканей

пальца, отличающихся экзогенностью структур [20], открывает широкие перспективы для использования данной методики в системах аутентификации личности.

### 5.6. Биоакустическое сканирование

Для реализации биоакустического сканирования дистальной фаланги пальца с помощью ультразвуковых волн предложено устройство [23], основой которого является линейный ультразвуковой датчик, работающий на частоте 15 МГц. Его конструкция с линейным расположением 64-256 пьезоэлектрических кристаллов создаёт идеально параллельные ультразвуковые волны, формирующие чёткое прямоугольное поле обзора без геометрических искажений. Схема аппаратной составляющей данного устройства представлена на рисунке 10.

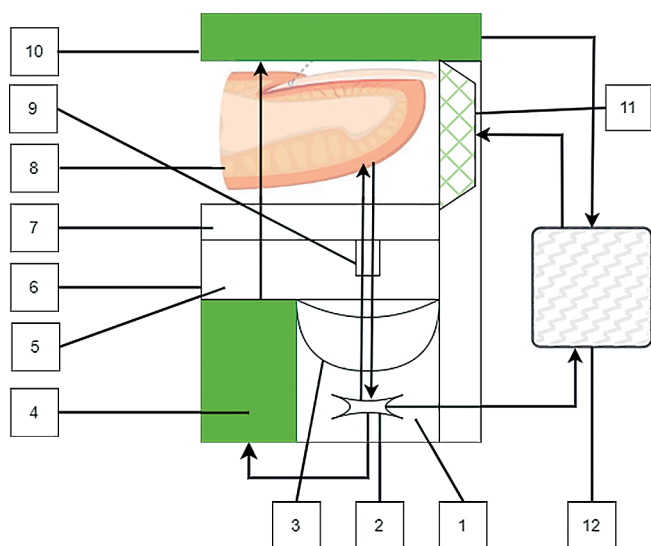


Рис. 10. Схема аппаратной составляющей устройства [23]

Благодаря высокой частоте и плотному расположению элементов датчик обеспечивает высокую детализацию поверхностных структур [20], позволяя различать микроскопические сосуды и тончайшие слои тканей. Проходя через различные структуры (костную, мышечную, жировую ткани), ультразвуковой сигнал подвергается характерным изменениям [22], отражающим уникальные анатомические особенности конкретного индивидуума. Приемная часть устройства фиксирует эти изменения, создавая

своеобразный «акустический портрет» внутреннего строения пальца.

Заключительный этап работы устройства заключается в комплексном анализе полученных данных. Алгоритмы на базе машинного обучения сравнивают глубинные параметры тканевой структуры с эталонными образцами, хранящимися в базе данных.

Способ биоакустического сканирования может быть реализован как часть системы многофакторной аутентификации в качестве одного из факторов подтверждения личности [28]. Применение данного способа особенно актуально при компрометации основного биометрического признака, в частности – отпечатка пальца (рис. 11).

Также важно отметить, благодаря непрерывному обучению нейросетевого программного комплекса [25] система сможет учитывать возрастные изменения тканей, избегая тем самым ложных отказов в доступе легитимным пользователям.

### Заключение

В ходе проведенного исследования предложена схема устройства регистрации биометрических характеристик пальца человека в рамках биоакустического сканирования. Данный способ может выступать в качестве дополнительного фактора аутентификации в системах распознавания личности, повышая их защищенность и эффективность аутентификации, так как описанный метод биоакустический сканирования дистальной фаланги пальца, в отличие от ультразвукового сканирования папиллярного узора, работает на более низких частотах (15–17 МГц) и позволяет фиксировать уникальные характеристики не только кожного покрова, но и более глубоких тканей пальца.

В отличие от традиционных методов, основанных на визуальных характеристиках (геометрии лица и изображения радужки глаза на фотографиях в открытом доступе, оставляемых на различных поверхностях отпечатков пальцев и т.д.), предложенная технология использует скрытые от прямого наблюдения параметры, что кардинально снижает вероятность их несанкционированного копирования. Дополнительным преимуществом является устойчивость к внешним факторам – загрязнению поверхности кожи, микротравмам эпидермиса и т.д.

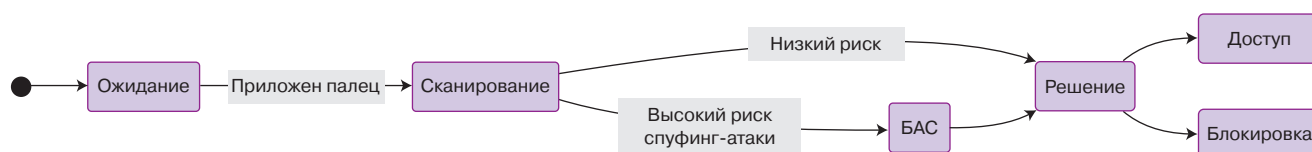


Рис. 11. Схема алгоритма разрабатываемого способа



## Литература

1. Sim J. Y. Identity Recognition Based on Bioacoustics of Human Body / Sim J. Y., Noh H. W., Goo W., Kim N., Chae S.-H. and Ahn C.-G. // IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 51, no. 5, pp. 2761–2772, May 2021, DOI: 10.1109/TCYB.2019.2941281.
2. Roy A. Masterprint: exploring the vulnerability of partial fingerprint-based authentication systems / Roy A., Memon N. and Ross A. // IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 12, no. 9, September 2017.
3. Bontrager P. DeepMasterPrints: generating MasterPrints for dictionary attacks via latent variable evolution / Bontrager P., Roy A., Togelius J., Memon N. and Ross A. // 2018 IEEE 9th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS), Redondo Beach, CA, USA, 2018, pp. 1–9, DOI: 10.1109/BTAS.2018.8698539.
4. Бондаренко И. Н. Ультразвуковая характеристика кожи, мягких тканей лица, шеи, кистей рук у женщин разных возрастных групп: нерандомизированное обсервационное кросс-секционное исследование // Кубанский научный медицинский вестник. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 16–28. – DOI 10.25207/1608-6228-2021-28-3-16-28.
5. Частикова В. А. Особенности реализации биометрической системы аутентификации личности на основе папиллярного узора / В. А. Частикова, В. Г. Гуляй, Д. С. Сучков // Молодежная наука. Сборник лучших научных работ молодых ученых: Материалы LI студенческой научной конференции, Краснодар, 29 февраля 2024 года. – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2024. – С. 222–225. – EDN RDBTAL.
6. Чайковская Т. В. Исследование напряженно-деформированного состояния кости средней фаланги указательного пальца руки человека при изменении плотности губчатой костной ткани / Т. В. Чайковская, Е. С. Марченко // Фундаментальные основы механики. – 2022. – № 10. – С. 119–122. – DOI 10.26160/2542-0127-2022-10-119-122. – EDN JAAFKI.
7. Частикова В. А. Предотвращение ошибок I рода при сканировании в системах контроля и управления доступом путем использования GAN-сети / В. А. Частикова, В. Г. Гуляй, Д. С. Сучков // Искусственный интеллект. Формирование будущего: Материалы I Международной научно-практической конференции, Краснодар, 29 апреля 2024 года. – Краснодар: ИП Алзидан М., 2024. – С. 296–299. – EDN ESSLTN.
8. Красов А. В. Разработка методологии тестирования систем защиты информации в виртуальных комплексах для обнаружения ошибок I и II-рода / А. В. Красов, Р. Р. Максудова, В. В. Нефедов [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2021. – № 1. – С. 45–52. – DOI 10.46418/2079-8199\_2021\_1\_7.
9. Частикова В. А. Подход к построению систем анализа инцидентов информационной безопасности на основе гибридизации методов машинного обучения / В. А. Частикова, В. Г. Гуляй // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2023. – № 6. – С. 107–117. – EDN YPTPGQ.
10. Suvorov A. Yu. Statistical hypothesis testing: general approach in medical research / A. Yu. Suvorov, N. M. Bulanov, A. N. Shvedova [et al.] // Sechenov Medical Journal. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 4–13. – DOI 10.47093/2218-7332.2022.426.08.
11. Исмагилов Р. Ф. Конструирование модели обучающей нейронной сети для биометрической многофакторной аутентификации пользователя информационной системы / Р. Ф. Исмагилов, Н. Д. Лушников, А. С. Исмагилова // Вопросы защиты информации. – 2023. – № 1(140). – С. 19–23. – DOI 10.52190/2073-2600\_2023\_1\_19.
12. Белов Н. И. Применение термографической модели лица в задачах идентификации и аутентификации / Н. И. Белов, В. М. Коржук // Computational Nanotechnology. – 2023. – Т. 10, № 3. – С. 109–120. – DOI 10.33693/2313-223X-2023-10-3-109-120.
13. Славолубова И. А. Дифференцирующие возможности папиллярных узоров средних фаланг пальцев рук (на примере евразийских популяций) / И. А. Славолубова, А. М. Юдина, Л. Ю. Шпак // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология. – 2023. – № 4. – С. 58–68. – DOI 10.32521/2074-8132.2023.4.058-068.
14. Частикова В. А. Нейросетевая система биометрической идентификации личности по голосу / В. А. Частикова, С. А. Жерлицын, Д. О. Войлова // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2023. – № 1(316). – С. 70–79. – DOI 10.53598/2410-3225-2023-1-316-70-79.
15. Пожар В. Э. Спектрально-поляризационные системы трёхмерного технического зрения на основе акустооптической фильтрации / В. Э. Пожар, А. С. Мачихин // Светотехника. – 2022. – № 5. – С. 32–35. – EDN BHPGOK.
16. Кормилина А. Р. Ультразвуковая эластография сдвиговой волны в оценке жёсткости костной мозоли / А. Р. Кормилина, М. Г. Тухба-туллин // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 122–128. – DOI 10.21569/2222-7415-2020-10-2-122-128.
17. Кольцова И. С. Акустоэлектронный метод измерения скорости ультразвуковых волн в жидкостях / И. С. Кольцова, А. С. Хомутова // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69, № 3. – С. 317–321. – DOI 10.31857/S032079192260041X.
18. Романенко К. В. Ультразвуковое исследование кожи / К. В. Романенко, О. О. Боровая, Н. В. Ермилова, В. В. Захарова // Тор-суевские чтения: научно-практический журнал по дерматологии, венерологии и косметологии. – 2021. – № 2(32). – С. 17–20. – EDN XSCBLX.
19. Потехин Д. С. Современные тенденции развития ультразвуковой диагностики / Д. С. Потехин, П. В. Комаров // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2022. – Т. 6, № 2. – С. 71–77. – EDN GGXQYK.
20. Янкевич С. В. Обзор схемотехнических решений при построении силовой части ультразвуковых генераторов / С. В. Янкевич, Г. В. Малинин // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 212–220. – EDN TTQVYO.
21. Борисов В. И. Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде двухмерной прямоугольной фазированной решетки / В. И. Борисов, А. С. Никитин, Е. Н. Прокопенко, С. С. Сергеев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 2(71). – С. 58–67. – DOI 10.53078/20778481\_2021\_2\_58.
22. Bessonov L. V. Constructing the dependence between the Young's modulus value and the Hounsfield units of spongy tissue of human femoral heads / L. V. Bessonov, A. A. Golyadkina, P. O. Dmitriev [et al.] // Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics. – 2021. – Vol. 21, No. 2. – P. 182–193. – DOI 10.18500/1816-9791-2021-21-2-182-193.
23. Кашин Я. М. Заявка на патент на изобретение № 2024118715 от 04.07.2024 «Устройство регистрации биометрических параметров для двухфакторной аутентификации личности» / Я. М. Кашин, В. А. Частикова, В. Г. Гуляй; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».

24. Кашин Я. М. Заявка на патент на способ № 2024118723 от 04.07.2024 «Способ двухфакторной аутентификации личности» / Я. М. Кашин, В. А. Частикова, В. Г. Гуляй; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».
25. Частикова В. А. Программа для идентификации личности по отпечатку пальца / В. А. Частикова, В. Г. Гуляй, Д. С. Сучков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661103, заявл. 07.05.2024; опубл. 15.05.2024, Российская Федерация.

## METHOD OF PERSONALITY RECOGNITION BASED ON BIOACOUSTIC SCANNING IN MULTI-FACTOR AUTHENTICATION SYSTEMS

Chastikova V. A.<sup>3</sup>, Gulyai V. G.<sup>4</sup>

**Keywords:** authentication, type I error, type II error, fingerprint, generative adversarial neural network, spoofing attack, biometric scanner, bioacoustics.

**The purpose of the study:** theoretical substantiation and development of a method of personality recognition based on bioacoustic scanning in order to implement the process of multi-factor authentication within one local device, as well as to minimize errors of the first and second types in multi-factor authentication systems.

**Research methods:** the methods of wave theory of physics were applied, including aspects of the propagation of ultrasonic waves and their interaction with biological tissues. Statistical methods for evaluating hypotheses and machine learning algorithms in the form of generative-adversarial neural networks were also used.

**Scientific novelty:** a new method of personality recognition based on bioacoustic scanning data characterizing the geometry of the bone of the distal phalanx of the finger and the ratio of soft tissues of the finger has been developed. The proposed bioacoustic method of scanning the distal phalanx of the finger, in contrast to ultrasound scanning of the papillary pattern, works at lower frequencies (15-17 MHz) and allows fixing the unique characteristics of not only the skin, but also deeper tissues Finger. The bone geometry of the distal phalanx, as well as the ratio of the soft tissues of the finger, has not previously been used as an authentication characteristic of a person.

**Result and practical significance:** the method of identity authentication by bioacoustic finger scanning is substantiated, within the framework of which the geometry of the bone of the distal phalanx of the finger is recorded, including protrusions, notches, ridges and nail tuberosity, which are unique for each person, and the relative location of the soft tissues of the finger pad, taking into account their mutual ratio in volume. The practical significance of the proposed method is due to the fact that this approach is less vulnerable to fakes and, accordingly, attacks with the help of dummies, since biometric characteristics are hidden from the eyes of the attacker, unlike the geometry of the face and the image of the iris of the eye in public photos, left on various surfaces of fingerprints, etc data transmission channels.

### References

1. Sim J. Y. Identity Recognition Based on Bioacoustics of Human Body / Sim J. Y., Noh H. W., Goo W., Kim N., Chae S.-H. and Ahn C.-G. // IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 51, no. 5, pp. 2761–2772, May 2021, DOI: 10.1109/TCYB.2019.2941281.
2. Roy A. Masterprint: exploring the vulnerability of partial fingerprint-based authentication systems / Roy A., Memon N. and Ross A. // IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 12, no. 9, September 2017.
3. Bontrager P. DeepMasterPrints: generating MasterPrints for dictionary attacks via latent variable evolution / Bontrager P., Roy A., Togelius J., Memon N. and Ross A. // 2018 IEEE 9th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS), Redondo Beach, CA, USA, 2018, pp. 1–9, DOI: 10.1109/BTAS.2018.8698539.
4. Bondarenko I. N. Ul'trazvukovaja harakteristika kozhi, m'jagkih tkanej lica, shei, kistej ruk u zhenshhin raznyh vozrastnyh grupp: nerandomizirovannoe observacionnoe kross-sekcionnoe issledovanie // Kubanskij nauchnyj medicinskij vestnik. – 2021. – T. 28, № 3. – S. 16–28. – DOI 10.25207/1608-6228-2021-28-3-16-28.
5. Chastikova V. A. Osobennosti realizacii biometricheskoj sistemy autentifikacii lichnosti na osnove papilljarnogo uzora / V. A. Chastikova, V. G. Gul'aj, D. S. Suchkov // Molodezhnaja nauka. Sbornik luchshih nauchnyh rabot molodyh uchenyh: Materialy LI studencheskoj nauchnoj konferencii, Krasnodar, 29 fevralja 2024 goda. – Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2024. – S. 222–225. – EDN RDBTAL.
6. Chajkovskaja T. V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija kosti srednej falangi ukazatel'nogo pal'ca ruki cheloveka pri izmenenii plotnosti gubchatoj kostnoj tkani / T. V. Chajkovskaja, E. S. Marchenko // Fundamental'nye osnovy mehaniki. – 2022. – № 10. – S. 119–122. – DOI 10.26160/2542-0127-2022-10-119-122. – EDN JAAFKI.
7. Chastikova V. A. Predotvrashhenie oshibok I roda pri skanirovanii v sistemah kontrolja i upravlenija dostupom putem ispol'zovanija GAN-seti / V. A. Chastikova, V. G. Gul'aj, D. S. Suchkov // Iskusstvennyj intellekt. Formirovanie budushhego: Materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Krasnodar, 29 aprilja 2024 goda. – Krasnodar: IP Alzidan M., 2024. – S. 296–299. – EDN ESSLTN.
- 3 Vera A. Chastikova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Information Protection, Kuban State Technical University, Krasnodar, Russia. E-mail: chastikova\_va@mail.ru
- 4 Victoria G. Gulyai, Student of the Institute of Computer Systems and Information Security, KubSTU, Krasnodar, Russia. E-mail: ms.gulyai@bk.ru

8. Krasov A. V. Razrabotka metodologii testirovaniya sistem zashhity informacii v virtual'nykh kompleksah dlja obnaruzheniya oshibok I i II-roda / A. V. Krasov, R. R. Maksudova, V. V. Nefedov [i dr.] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tehnologii i dizajna. Seriya 1: Estestvennye i tehnicheckie nauki. – 2021. – № 1. – S. 45–52. – DOI 10.46418/2079-8199\_2021\_1\_7.
9. Chastikova V. A. Podhod k postroeniju sistem analiza incidentov informacionnoj bezopasnosti na osnove gibrizacii metodov mashin-nogo obuchenija / V. A. Chastikova, V. G. Guljaj // Jelektronnyj setevoj politematicheskij zhurnal «Nauchnye trudy KubGTU». – 2023. – № 6. – S. 107–117. – EDN YPTPGQ.
10. Suvorov A. Yu. Statistical hypothesis testing: general approach in medical research / A. Yu. Suvorov, N. M. Bulanov, A. N. Shvedova [et al.] // Sechenov Medical Journal. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 4–13. – DOI 10.47093/2218-7332.2022.426.08.
11. Ismagilov R. F. Konstruirovanie modeli obuchajushhej nejronnoj seti dlja biometricheskoj mnogofaktornoj autentifikacii pol'zovatelja informacionnoj sistemy / R. F. Ismagilov, N. D. Lushnikov, A. S. Ismagilova // Voprosy zashhity informacii. – 2023. – № 1(140). – S. 19–23. – DOI 10.52190/2073-2600\_2023\_1\_19.
12. Belov N. I. Primenenie termograficheskij modeli lica v zadachah identifikacii i autentifikacii / N. I. Belov, V. M. Korzhuk // Computational Nanotechnology. – 2023. – T. 10, № 3. – S. 109–120. – DOI 10.33693/2313-223X-2023-10-3-109-120.
13. Slavoljubova I. A. Differencirujushhie vozmozhnosti papilljarnykh uzorov srednih falang pal'cev ruk (na primere evrazijskikh populjacij) / I. A. Slavoljubova, A. M. Judina, L. Ju. Shpak // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 23: Antropologija. – 2023. – № 4. – S. 58–68. – DOI 10.32521/2074-8132.2023.4.058-068.
14. Chastikova V. A. Nejrosetevaja sistema biometricheskoj identifikacii lichnosti po golosu / V. A. Chastikova, S. A. Zherlicyn, D. O. Vojlova // Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskije i tehnicheckie nauki. – 2023. – № 1(316). – S. 70–79. – DOI 10.53598/2410-3225-2023-1-316-70-79.
15. Pozhar V. Je. Spektral'no-poljarizacionnye sistemy trjohmernogo tehnicheckogo zrenija na osnove akustoopticheskoy fil'tracii / V. Je. Pozhar, A. S. Machihin // Svetotehnika. – 2022. – № 5. – S. 32–35. – EDN BHPGOK.
16. Kormilina A. R. Ul'trazvukovaja j elastografija sdvigovoj volny v ocenke zhjostkosti kostnoj mozoli / A. R. Kormilina, M. G. Tuhbatullin // Rossijskij jelektronnyj zhurnal luchovoj diagnostiki. – 2020. – T. 10, № 2. – S. 122–128. – DOI 10.21569/2222-7415-2020-10-2-122-128.
17. Kol'cova I. S. Akustoelektronnyj metod izmerenija skorosti ul'trazvukovykh voln v zhidkostjah / I. S. Kol'cova, A. S. Homutova // Akusticheskij zhurnal. – 2023. – T. 69, № 3. – S. 317–321. – DOI 10.31857/S032079192260041X.
18. Romanenko K. V. Ul'trazvukovoe issledovanie kozhi / K. V. Romanenko, O. O. Borovaja, N. V. Ermilova, V. V. Zaharova // Torsuevskie chtenija: nauchno-prakticheskij zhurnal po dermatologii, venerologii i kosmetologii. – 2021. – № 2(32). – S. 17–20. – EDN XSCBLX.
19. Potehin D. S. Sovremennye tendencii razvitiya ul'trazvukovoj diagnostiki / D. S. Potehin, P. V. Komarov // Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tehnologii. – 2022. – T. 6, № 2. – S. 71–77. – EDN GGXYQK.
20. Jankevich S. V. Obzor shemotehnicheckih reshenij pri postroenii silovoj chasti ul'trazvukovykh generatorov / S. V. Jankevich, G. V. Malinin // Vestnik Chuvashskogo universiteta. – 2020. – № 1. – S. 212–220. – EDN TTQVYO.
21. Borisov V. I. Akusticheskoe pole izluchenija p'ezopreobrazovatelja v vide dvuhmernoj prjamougol'noj fazirovannoj reshetki / V. I. Borisov, A. S. Nikitin, E. N. Prokopenko, S. S. Sergeev // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. – 2021. – № 2(71). – S. 58–67. – DOI 10.53078/20778481\_2021\_2\_58.
22. Bessonov L. V. Constructing the dependence between the Young's modulus value and the Hounsfield units of spongy tissue of human femoral heads / L. V. Bessonov, A. A. Golyadkina, P. O. Dmitriev [et al.] // Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics. – 2021. – Vol. 21, No. 2. – P. 182–193. – DOI 10.18500/1816-9791-2021-21-2-182-193.
23. Kashin Ja. M. Zajavka na patent na izobretenie № 2024118715 ot 04.07.2024 «Ustrojstvo registracii biometricheskikh parametrov dlja dvuhfaktornoj autentifikacii lichnosti» / Ja. M. Kashin, V. A. Chastikova, V. G. Guljaj; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Kubanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet».
24. Kashin Ja. M. Zajavka na patent na sposob № 2024118723 ot 04.07.2024 «Sposob dvuhfaktornoj autentifikacii lichnosti» / Ja. M. Kashin, V. A. Chastikova, V. G. Guljaj; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Kubanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet».
25. Chastikova V. A. Programma dlja identifikacii lichnosti po otpechatku pal'ca / V. A. Chastikova, V. G. Guljaj, D. S. Suchkov // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2024661103, zajavl. 07.05.2024; opubl. 15.05.2024, Rossijskaja Federacija.

