



**БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ДЫХАНИЯ:
(обзор литературы)**

А.А. ГАРАНИН, И.Д. ШИПУНОВ, А.О. РУБАНЕНКО, Н.О. САННИКОВА

ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России, ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара, 443099, Россия

Аннотация. В настоящее время имеется большое количество различных методов определения частоты дыхательных движений, в том числе с использованием бесконтактных способов, и врачам практического здравоохранения зачастую бывает довольно трудно разобраться во всем этом многообразии, особенно учитывая активно внедряющиеся в современную клиническую практику телемедицинские технологии. Поэтому актуальным представляется обобщение информации о вышеуказанных методах с указанием их преимуществ и недостатков. Обзор посвящен анализу современных методов бесконтактного измерения частоты дыхательных движений, возможностей их использования в клинической практике, тренировках и повседневной жизни. Бесконтактные методы определения и мониторинга частоты дыхания активно развиваются в течение последних десятилетий. Несмотря на разнообразие методов и подходов, каждый из них подвержен своим недостаткам, для преодоления которых необходимо дальнейшее техническое совершенствование, сочетание нескольких методов и подключение к обработке информации технологии искусственного интеллекта. В результате развития, бесконтактные методы могут стать незаменимым инструментом для длительного дистанционного мониторинга жизненных функций пациентов как в стационарных, так и в амбулаторных условиях. Развитие новых технологий телемониторинга жизненно важных функций и их внедрение в клиническую практику в нашей стране является особенно актуальным в виду наличия дефицита медицинских кадров и фактора расстояния, когда существуют условия территориальной разобщенности врача и пациента.

Ключевые слова: бесконтактные методы, частота дыхания, дистанционный мониторинг, телемедицина

METHODS OF NON-CONTACT RESPIRATORY RATE MEASUREMENT: (literature review)

A.A. GARANIN, I.D. SHIPUNOV, A.O. RUBANENKO, N.O. SANNIKOVA

Samara State Medical University, Chapayevskaya st., 89, Samara, 443099, Russia

Abstract. Currently, there are many different methods of respiratory rate measurement, including non-contact ones and medical practitioners often find it difficult to figure out all these multiple methods, especially taking into consideration telemedicine technologies being actively introduced into modern clinical practice. It determines the relevance of generalizing the information about the above methods and indicating their advantages and disadvantages. The review is devoted to the analysis of modern respiratory rate non-contact measurement methods and opportunities of their usage in clinical practice, training and routine. Non-contact methods respiratory rate measurement and monitoring are actively developing in the last decades. Despite the diversity of methods and approaches, each of them has its own disadvantages. To overcome these disadvantages, further technical improvement, combination of several methods and usage of AI technologies in information processing are necessary. As a result of their development, non-contact methods have a chance of becoming an indispensable tool for long-term remote monitoring of vital functions in patients during both inpatient and outpatient treatment. Development of new technologies for remote monitoring of vital functions and the introduction of these technologies into clinical practice in our country are especially relevant due to the lack of medical personnel and the distance factor when there is a territorial isolation between a doctor and a patient.

Key words: non-contact methods, respiratory rate, remote monitoring, telemedicine.

Частота дыхательных движений (ЧДД) – один из основных показателей жизнедеятельности, определяемый врачами с древних времен. Измерение данного показателя представляет важную информацию об особенностях функционирования организма человека в покое, а также в условиях различных экзо- и эндогенных факторов, таких как эмоциональный стресс, умственная и физическая нагрузка, воздействие высоких и низких температур [28]. Данные о ЧДД и функции внешнего дыхания способны помочь в оптимизации тренировочного процесса спортсменов [3, 4, 29].

Использование традиционного визуального способа определения ЧДД путем подсчета количества движений грудной клетки в сочетании с данными респиратора и осмотра позволяет врачу получить пред-

ставление о наличии у пациента дыхательной недостаточности, развития поражения или травмы центральной нервной системы, а также ряда других патологических состояний.

Современные технологии позволяют использовать для определения ЧДД различные контактные и бесконтактные методы, которые значительно расширяют возможности исследователей и врачей [6, 23]. К давно изученным и активно применяющимися в клинической практике методам оценки ЧДД относятся контактные методы, которые подразумевают использование датчиков, прикрепляющихся к пациенту. К последним относят тензометрические датчики, датчики движения и другие. Принимая во внимание хорошо известные преимущества этих датчиков, необходимо отметить, что они имеют также ряд недостатков при проведении длительного мониторинга ЧДД, такие как необходимость контакта с телом, наличие проводов, питательного элемента. Эти факторы могут доставлять пациенту неудобства, особенно при необходимости проведения мониторинга в ночное время, а также использование некоторых датчиков может сопровождаться раздражением кожи. Все вышеуказанные факторы могут снизить диагностическую ценность контактных методов измерения ЧДД в реальной клинической практике. В связи с вышеизложенным в последнее время активно развиваются и внедряются в клиническую практику бесконтактные методы измерения ЧДД, которые позволяют преодолеть ряд недостатков контактных методов.

В последнее время все большую актуальность приобретает мониторинг различных биологических функций с использованием технологии искусственного интеллекта: такой мониторинг позволяет расширить возможности обследований, повысить точность измерения и прогнозировать развитие неблагоприятных клинических явлений [5, 35, 18]. Учитывая ожидаемое в будущем старение населения, неизбежно сопровождающееся увеличением нагрузки на систему здравоохранения, крайне важным является развитие телемедицинских систем, позволяющих проводить дистанционный мониторинг состояния большого количества пациентов с использованием различных неинвазивных датчиков [27, 24].

Таким образом, в настоящее время имеется большое количество различных методов определения ЧДД с использованием контактных и бесконтактных способов, и врачам практического здравоохранения зачастую бывает довольно трудно разобраться во всем этом многообразии, особенно учитывая активно внедряющиеся в современную клиническую практику телемедицинские технологии. Поэтому актуальным представляется анализ современных бесконтактных методов определения частоты дыхания с указанием преимуществ и недостатков последних.

Цель данного обзора – проанализировать современные методы бесконтактного измерения ЧДД, возможности их использования в клинической практике, тренировках и повседневной жизни.

Поиск информации осуществлялся в поисковых системах *PubMed* и *E-library*. Для поиска использовались следующие ключевые слова: «*respiratory rate*», «*non-contact*», «*contactless*», «*measurement*».

Развитие бесконтактных методов измерения ЧДД значительно расширяет возможности для организации длительного удаленного мониторинга жизненных функций пациента как на базе лечебного учреждения, так и амбулаторно. Однако, некоторые бесконтактные способы имеют недостаток – сложность в настройке и установке оборудования, и поэтому нередко требуют помощи квалифицированных специалистов. Данный недостаток могут в определенной степени компенсировать интегрированные решения, информация о которых будет представлена ниже [7].

В настоящее время совершенствуются методы, позволяющие проводить **видеомониторинг ЧДД с использованием камеры** в реальном времени без ограничения положения или движений пациента. Хотя на сегодняшний день данная технология требует доработок, она видится крайне перспективной в контексте длительного мониторинга жизненных функций в домашних условиях [21, 10]. В другом исследовании, посвященном видеомониторингу ЧДД по движению грудной клетки с помощью веб-камеры, было установлено, что, несмотря на невысокое разрешение передаваемого видеоряда (640*480), погрешность измерения составила не более 2.8 вдохов в минуту и в целом была сопоставима с результатами определения ЧДД по электрокардиограммам [2]. Описанные работы предлагают определение движений поверхности тела в общем и грудной клетки в частности для определения ЧДД с возможностью потоковой передачи видео в центр, осуществляющий мониторинг. Следует отметить, что в настоящее время проводится ряд мероприятий для повышения диагностической ценности определения ЧДД по данным видеомониторинга, включающие адаптивное обнаружение дыхательных движений грудной клетки, адаптивное выделение области интереса для устранения помех, связанных с окружением, онлайн-адаптацию к освещению и т.д. [21]. Кроме того, разрабатываются и активно внедряются высокоэффективные алгоритмы извлечения сигналов дыхания из видеопотока [10].

Описана технология определения ЧДД с помощью **постобработки видеоряда**, записанного обычной *RGB*-камерой домашнего ноутбука – производимый анализ изменения насыщенности пикселей позволяет построить волнообразный график, указывающий на характер дыхания. Погрешность такого метода составила менее 1 вдоха в минуту (от 0.01 до 0.21 в зависимости от работы) [25, 37]. Схожая технология применима также и к видеороликам, снятым на камеру смартфона [9]. В общем и целом, совершенствование технологии определения ЧДД по видеороликам, алгоритмов сбора и обработки информации, борьбы с возникающими артефактами является крайне перспективной в наблюдении за состоянием

здоровых людей или пациентов, страдающих различными заболеваниями. Однако данный подход нуждается в определенном совершенствовании для определения сложных паттернов дыхания.

Существует ряд работ, посвященных технологии измерения ЧДД и частоты сердечных сокращений с помощью определения *пульсирующих фотоплетизмографических сигналов* в коротких видеороликах с лицом пациента, заснятых на камеру обычного смартфона. В рамках данной технологии используется подход определения флуктуаций цветов в определенных зонах интереса на лице в цветовых моделях RGB и HSV. Несмотря на продемонстрированную точность, описанный метод в настоящее время имеет значимые ограничения – он неприменим у пациентов с закрытым лбом (например, стрижками с челкой), со шрамами или массивной бородой, а также при ношении некоторых головных уборов (бейсболка, шляпа, тюрбан и т.д.) [31, 12]. Еще большей точности возможно добиться при сравнении результатов видео-плетизмографии с движениями головы [16]. Несмотря на технические ограничения, технология видится авторам крайне перспективной, особенно в контексте стремительного развития технологии искусственного интеллекта и нейросетей.

В последнее время стали появляться исследования, использующие *нейронные сети* для определения ЧДД. В частности, в литературе описан метод определения ЧДД через камеру смартфона, основанный на кластеризации пикселей с помощью одномерных сверточных нейронных сетей. Описанный метод имеет производительность 20 кадров в секунду и сохраняет работоспособность даже при наличии цифрового шума определенной интенсивности. В сравнении с контактными методами, точность описанного метода составила 93% [15].

Кроме того, разработаны информационные модели для определения объектов, основанные на технологии глубокого обучения (например, технология *YOLO*). Данная модель уже успешно применялась в контексте длительного мониторинга ЧДД с использованием *тепловизионной камеры (тепловизора)*, представляющая собой инфракрасную термографию. Как известно, основным недостатком использования тепловизоров для измерения ЧДД является необходимость идентификации ноздрей пациента для корректной оценки данного показателя, что может нарушаться у пациентов с густыми усами, наличием маски на лице (например, при проведении искусственной вентиляции легких), при использовании устройств, создающих положительное давление в дыхательных путях (например, при проведении *CPAP* терапии).

В исследовании *Kwon H.M. et al. (2021)* при сравнении тепловизора с прямым подсчетом ЧДД ошибка измерения составила -0,139 дыханий в минуту, при этом коэффициент корреляции составил 0,95 [19]. При этом авторы указывали на то, что требуется дополнительная работа для автоматизации получения изображения, а также для идентификации ноздрей пациента в ходе проведения измерения ЧДД [19]. Использование вышеуказанной технологии *YOLO* помогло отойти от необходимости фиксировать зону носовых ходов для вычисления ЧДД – достаточно наличия лица в камере. При этом, погрешность составила всего 0,66 дыханий в минуту [34]. В целом, классический метод термографического определения ЧДД основан на определении температуры кожи крыльев носа, остывающей при вдохе и нагревающейся при выдохе. Именно поэтому классическая термометрия предполагает необходимость наличия в кадре крыльев носа, носовых ходов. При классической термометрии, как правило, фиксируется только вдох, в то время, как выдох и пауза между дыхательными маневрами не определяется. Кроме того, при высокой температуре окружающей среды, точность метода снижается, а при низкой, соответственно, повышается [1]. Также ограничением данного метода может являться отсутствие носового дыхания пациента (дыхание через рот). По сути, отличия методов термографического определения ЧДД заключается в используемых моделях расчета, определения объектов и вспомогательном программном обеспечении.

Как видно из приведенного выше описания методов, многие из них требуют вовлечения человека в процесс измерения – необходимость размещения лица, носа или грудной клетки в кадре, некоторые ограничения во внешнем виде и окружающей обстановке.

Однако сегодня существуют иные подходы, предъявляющие более высокие требования к техническому обеспечению, однако компенсирующие вышеизложенные ограничения. Одним из таких методов является мониторинг на основе *эффекта Доплера*. Доплеровский радар может измерять частоту дыхания за счет улавливания беспроводных сигналов, модулируемых движениями грудной клетки. Расположенные, например, в палате датчики позволяют отслеживать амплитуду вышеуказанных движений. Сами методики оценки ЧДД при этом могут быть различными, например, некоторые приборы проводят измерение периодических изменений времени, необходимого для отражения сигналов от грудной клетки обратно к устройству. Другие приборы используют непрерывные волновые сигналы для точного перенаправления радиоволн на грудную клетку испытуемых, для контроля дыхания на расстоянии во время сна. Сигналы посылаются к пациенту с помощью импульсного радио-радар, при этом дыхательные движения выделяются из частотного спектра принятого сигнала [11]. Так, по данным *Dou C. et al. (2021)* точность данного метода оказалась хорошей, максимальная ошибка измерения составила менее 0,7 дыхательных движений, а средняя – 0,15 в минуту [11]. При этом возможна синхронизация датчиков с носи-

мыми коммерческими устройствами и смартфонами через общую *Wi-Fi* сеть для обеспечения длительного мониторинга [11].

Как правило, при использовании единственного доплеровского радара, возникают значимые ограничения, связанные с физическими явлениями (нулевая точка, смещение постоянного тока, дрейф постоянного тока, разворачивание фазы), со сложностью обработки данных (проблема отделения сигнала сердца от сигнала дыхания и проблема гармоник сигнала дыхания) и с искажениями, вызванными спонтанными движениями человека, например, во сне. Однако современными исследователями предложены способы решения описанных проблем, заключающиеся во внедрении определенных алгоритмов данных, технических решений и использовании двух доплеровских радаров, расположенных на противоположных направлениях или сочетания доплеровского радара и обыкновенной камерой, запись с которой переводится в фазовый сигнал [14, 22, 13].

В целом, доплеровский радар также имеет ряд ограничений: достаточно значимые погрешности могут наблюдаться при патологическом дыхании, точность зависит от расстояния между человеком и радаром, от интенсивности цифрового шума [8]. Однако, как показал опыт исследователей, многие из описанных проблем нивелируются теми или иными технологическими решениями. Также некоторым ограничением данной методики может являться то, что для ее проведения нужно дорогостоящее оборудование, специальные компьютерные программы и обученный персонал, что, на данный момент, ограничивает использование в реальной клинической практике. В тоже время, в результате дальнейшего развития и совершенствования, доплеровский радар сможет эффективно использоваться для длительного бесконтактного мониторинга жизненных функций.

Еще одним перспективным методом мониторинга является определение ЧДД с помощью **ультрашироковолновых радиорадаров** – размещенные в различных местах комнаты приемники воспринимают излучаемые радиоволны, компьютер анализирует их изменения после контакта с дышащим человеком. Важной особенностью данного метода является способность определять длительность периода апноэ и патологического дыхания. Кроме того, радиоволны не чувствительны к случайным небольшим движениям, подергиваниям и изменениям положения тела, оказывающим значимое влияние на мониторинг с помощью видеокamеры или доплеровского радара. В исследовании *Vasu V. et al.* (2010) при сравнении с референсным методом измерения ЧДД – индукционной плетизмографией, абсолютная ошибка составила всего 0,39 дыхания в минуту [38]. Авторы сделали вывод, что точность измерения данной системы значительно коррелирует с стандартными нагрудными системами измерения дыхания на основе индуктивной плетизмографии и не зависит от местонахождения человека по отношению к приемникам, однако может значимо изменяться, если человек совершает боковое смещение более 20 см во время измерения. То есть мониторинг должен проводиться во время сна на одноместной кровати [38, 30]. В исследовании *Lauteslager T. et al.* (2021), при проведении прямого сравнения ультрашироковолнового радиорадара с результатами капнографии, носового давления, а также с поясом, регистрирующим движение грудной клетки и живота, было получено, что ошибка измерения новой методики составила от -0,27 до -0,85 дыханий в минуту, что говорит о незначительной переоценке ЧДД по данным радиорадара, по сравнению с традиционными методами [20]. В этом же исследовании при сравнении точности данного метода у пациентов при различных положениях (сидя, лежа лицом к устройству, лицом от устройства, лежа, накрывшись одеялом и т.д.), а также различном удалении от прибора (от 0,5 до 1,5 метров) ошибка измерения ЧДД составила от -0,6 до -1,0 дыханий в минуту, также демонстрируя небольшую переоценку ЧДД, по сравнению с референсными методами [20]. Впрочем, полученные в данном исследовании ошибки измерения являются допустимыми и не снижают ценность данного метода в клинической практике. Таким образом, данный метод имеет большие перспективы, например, в изучении апноэ сна и других нарушений дыхания.

На схожем принципе основан метод определения ЧДД с помощью **микроволновых антенн**, прикрепленных к потолку. Такой метод также позволяет проводить длительный высокоточный мониторинг дыхательной функции у спящих или лежащих пациентов, в условиях детских реанимаций, домов престарелых, реанимаций, машин скорой помощи и т.д. [36, 33, 26]. По данным *Uenoyama M. et al.* (2006) при сравнении этой системы с датчиками дыхания была продемонстрирована высокая корреляционная взаимосвязь как для здоровых добровольцев ($r=0,97$; $p<0,001$), так и для пожилых добровольцев ($r=0,98$; $p<0,001$) [36]. Микроволновые антенны позволяют проводить измерение даже через одежду и постельные принадлежности (одеяло), могут выявить даже незначительные изменения ЧДД, однако могут быть чувствительными к посторонним шумам [26, 36].

Характеристика бесконтактных методов оценки частоты дыхания

Метод	Преимущества	Недостатки
Видеомониторинг с использованием камеры, постобработка видеоряда	Нетребовательность к качеству видеосигнала Возможность использования со смартфоном Невысокая стоимость	Чувствительность к посторонним движущимся объектам в кадре Некоторая чувствительность к освещенности Ошибки измерения ЧДД при некоторых вариантах нарушения дыхания
Определение пульсирующих фотоплетизмографических сигналов	Нетребовательность к качеству видеосигнала Возможность использования со смартфоном Невысокая стоимость	Зависимость от внешнего вида, одежды, особенностей пациента (закрытый лоб, шрамы, массивная борода, шляпа, тюрбан и т.д.)
Тепловизионная камера	Непрямая оценка вентиляции легких Возможность измерять ЧДД сразу у нескольких пациентов в одном кадре Хорошее выявление эпизода апноэ	Необходимость идентификации ноздрей пациента (зависит от программного обеспечения). Необходимость хорошего носового дыхания пациента. Зависимость от температуры окружающей среды.
Допплеровский радар	Хорошая точность измерения (особенно при использовании двух радаров) Не требует участия пациента Возможность использования вместе со смартфонами	Ошибки измерения ЧДД при некоторых вариантах нарушения дыхания Высокая стоимость Необходимость специального обучения персонала Чувствительность к движениям пациента (при использовании одного радара) Сложность обработки данных
Ультрашироковолновые радиорадары	Способность определять апноэ и различные варианты нарушения дыхания Нечувствительность к движениям пациента Высокая точность измерения	Чувствительность к боковым движениям человека во время сна (более 20 см) Небольшая переоценка ЧДД
Микроволновые антенны	Высокая точность измерения Возможность длительного мониторинга Возможность измерения ЧДД через одежду, одеяло и т.д. Возможность выявления апноэ, патологического дыхания Возможность отдельного измерения ЧДД и частоты сердечных сокращений	Возможная чувствительность к постороннему шуму
Тензодатчики для удаленного измерения ЧДД	Мониторинг может проводиться без участия пациента (или с минимальным участием) Достаточно высокая точность измерений Возможность длительного мониторинга	Возможно недостаточная точность в выявлении апноэ сна Частые сигналы тревоги

Исследователями был разработан и описан крайне интересный метод длительного мониторинга ЧДД, основанный на применении *тензодатчиков*, расположенных под ножками кровати. Данные датчики фиксируют изменения центра тяжести вдоль продольной оси кровати, происходящие в процессе дыхания пациента. При этом, положение тела пациента (сидя, лежа на спине, животе или боку) значения

не имеют. При этом, ошибка измерения в сравнении с пневмотахографией составляла от 0,26 до 1,59 вдохов в минуту в зависимости от ЧДД и длительности исследования [17, 32]. Данные методы могут быть использованы как для длительного мониторинга жизненных функций как в домашних условиях, так и для наблюдения за стационарными пациентами с высоким риском неблагоприятных событий для своевременного оповещения медицинского персонала о появлении аномального дыхания или о его полной остановке.

Характеристика основных бесконтактных методов измерения ЧДД с указанием их преимуществ и недостатков представлена в табл. 1.

Заключение. В целом, бесконтактные методы определения и мониторинга ЧДД активно развиваются в течение последних десятилетий. Несмотря на разнообразие методов и подходов, каждый из них подвержен своим недостаткам, для преодоления которых необходимо дальнейшее техническое совершенствование, сочетание нескольких методов и подключение к обработке информации технологии искусственного интеллекта. В результате развития, бесконтактные методы могут стать незаменимым инструментом для длительного дистанционного мониторинга жизненных функций пациентов как в стационарных, так и в амбулаторных условиях.

Литература

1. Берловская Е.Е., Черкасова О.П., Ожередов И.А., Адамович Т.В., Исайчев Е.С., Исайчев С.А., Макуренок А.М., Вараксин А.Н., Гатиллов С.Б., Куренков Н.И., Черногоризов А.М., Шкуринов А.П. Бесконтактная регистрация функции дыхания на основе анализа ИК-ТГц-изображений лица человека // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 6. С. 959-967. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-737.
2. Пуртов К.С., Соколов П.А., Конторович М.Б., Чистяков А.В., Костоусов В.Б., Кубланов В.С. Анализ видеоизображения человека для определения частоты его дыхания // Конференция молодых ученых – 2017: материалы конференции., Екатеринбург, 2017. С. 393-396.
3. Румянцев А.А., Шляхтов В.Н. Исследование параметров внешнего дыхания у гимнастов во время выполнения акробатических упражнений // Учёные записки университета им. П.Ф. Лесгафта: научно-теоретический журнал. 2010. N 12 (70). С. 96-100
4. Румянцев А. А., Шляхтов В.Н. Применение современных инструментальных технологий в подготовке гимнастов // Современные тенденции развития экономики и образования региона: Материалы III Региональной научно-практической конференции, Великие Луки, 13–14 декабря 2018 года. Великие Луки: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Мир науки", 2019. С. 119-123.
5. Adamidi E.S., Mitsis K., Nikita K.S. Artificial intelligence in clinical care amidst COVID-19 pandemic: A systematic review // Comput Struct Biotechnol J. 2021. № 19. P. 2833-2850. DOI: 10.1016/j.csbj.2021.05.010.
6. Al-Khalidi F.Q., Saatchi R., Burke D., Elphick H., Tan S. Respiration rate monitoring methods: a review // *Pediatr Pulmonol*. 2011. Vol. 46. № 6. P.523-9. DOI: 10.1002/ppul.21416
7. Ali M., Elsayed A., Mendez A., Savaria Y., Sawan M. Contact and Remote Breathing Rate Monitoring Techniques: A Review // *IEEE Sens J*. 2021. Vol. 21. № 13. P. 14569-14586. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3072607.
8. Apriono C., Muin F., Juwono F.H. Portable Micro-Doppler Radar with Quadrature Radar Architecture for Non-Contact Human Breath Detection // *Sensors (Basel)*. 2021. Vol. 21. № 17. P. 5807. DOI: 10.3390/s21175807.
9. Bae S., Borac S., Emre Y., Wang J., Wu J., Kashyap M., Kang SH., Chen L., Moran M., Cannon J., Teasley ES., Chai A., Liu Y., Wadhwa N., Krainin M., Rubinstein M., Maciel A., McConnell MV., Patel S., Corrado GS., Taylor JA., Zhan J., Po MJ. Prospective validation of smartphone-based heart rate and respiratory rate measurement algorithms // *Commun Med (Lond)*. 2022. № 2. P. 40. DOI: 10.1038/s43856-022-00102-x.
10. Bartula M., Tigges T., Muehlsteff J. Camera-based system for contactless monitoring of respiration // *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2013. P. 2672-5. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610090.
11. Dou C., Huan H. Full Respiration Rate Monitoring Exploiting Doppler Information with Commodity Wi-Fi Devices // *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 3505.
12. Favilla R., Zuccala V.C., Coppini G. Heart Rate and Heart Rate Variability From Single-Channel Video and ICA Integration of Multiple Signals // *IEEE J Biomed Health Inform*. 2019. Vol. 23. N 6. P. 2398-2408. DOI: 10.1109/JBHI.2018.2880097.
13. Gu C., Wang G., Li Y., Inoue T., Li C. A Hybrid Radar-Camera Sensing System With Phase Compensation for Random Body Movement Cancellation in Doppler Vital Sign Detection // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2013. Vol. 61. N 12. P. 4678-4688. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2288226.
14. Hernandez-Aguila M., Olvera-Cervantes J.L., Perez-Ramos AE., Corona-Chavez A. Methodology for the determination of human respiration rate by using Doppler radar and Empirical Modal Decomposition // *Sci Rep*. 2022. Vol. 12. № 1. P. 8675. DOI: 10.1038/s41598-022-12726-z.
15. Hwang HS, Lee EC. Non-Contact Respiration Measurement Method Based on RGB Camera Using 1D Convolutional Neural Networks // *Sensors (Basel)*. 2021. Vol. 21. N 10. P. 3456. DOI: 10.3390/s21103456.

16. Iozza L., Lázaro J., Cerina L., Silvestri D., Mainardi L., Laguna P., Gil E. Monitoring breathing rate by fusing the physiological impact of respiration on video-photoplethysmogram with head movements // *Physiol Meas.* 2019. Vol. 40. № 9. P. 094002. DOI: 10.1088/1361-6579/ab4102.
17. Isono S., Nozaki-Taguchi N., Hasegawa M., Kato S., Todoroki S., Masuda S., Iida N., Nishimura T., Noto M., Sato Y. Contact-free unconstrained respiratory measurements with load cells under the bed in awake healthy volunteers: breath-by-breath comparison with pneumotachography. *J Appl Physiol* (1985). 2019. Vol. 126. № 5. P. 1432-1441. DOI: 10.1152/jappphysiol.00730.2018.
18. Jagadev P., Giri LI. Human respiration monitoring using infrared thermography and artificial intelligence // *Biomed Phys Eng Express.* 2020. Vol. 6. № 3. P. 035007. DOI: 10.1088/2057-1976/ab7a54.
19. Kwon HM., Ikeda K., Kim SH., Thiele RH. Non-contact thermography-based respiratory rate monitoring in a post-anesthetic care unit // *J Clin Monit Comput.* 2021. Vol. 35. N 6. P. 1291-1297. DOI: 10.1007/s10877-020-00595-8.
20. Lauteslager T., Maslik M., Siddiqui F., Marfani S., Leschziner GD., Williams AJ. Validation of a New Contactless and Continuous Respiratory Rate Monitoring Device Based on Ultra-Wideband Radar Technology // *Sensors (Basel).* 2021. Vol. 21. N 12. P. 4027. DOI: 10.3390/s21124027.
21. Lee YC., Syakura A., Khalil M.A. et al. A real-time camera-based adaptive breathing monitoring system // *Med Biol Eng Comput.* 2021. Vol. 59. P. 1285–1298.
22. Li C., Lin J. Random Body Movement Cancellation in Doppler Radar Vital Sign Detection // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* 2008. Vol. 56. N 12. P. 3143-3152. DOI: 10.1109/TMTT.2008.2007139.
23. Liu H., Allen J., Zheng D., Chen F. Recent development of respiratory rate measurement technologies // *Physiol Meas.* 2019. Vol. 40. N 7. P. 07TR01. DOI: 10.1088/1361-6579/ab299e.
24. Majumder S., Mondal T., Deen M.J. Wearable Sensors for Remote Health Monitoring // *Sensors (Basel).* 2017. Vol. 17. N 1. P. 130. DOI: 10.3390/s17010130.
25. Massaroni C., Lo Presti D., Formica D., Silvestri S., Schena E. Non-Contact Monitoring of Breathing Pattern and Respiratory Rate via RGB Signal Measurement // *Sensors (Basel).* 2019. Vol. 19. № 12. P. 2758. DOI: 10.3390/s19122758.
26. Matsui T., Yoshida Y., Kagawa M., Kubota M., Kurita A. Development of a practicable non-contact bedside autonomic activation monitoring system using microwave radars and its clinical application in elderly people. *J Clin Monit Comput.* 2013. Vol. 27. № 3. P. 351-356. DOI: 10.1007/s10877-013-9448-3.
27. Mechanic OJ., Persaud Y., Kimball AB. Telehealth Systems. 2022. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023.
28. Nicolo A., Massaroni C., Schena E., Sacchetti M. The Importance of Respiratory Rate Monitoring: From Healthcare to Sport and Exercise // *Sensors (Basel).* 2015. Vol. 9. № 20(21). P. 6396. DOI: 10.3390/s20216396
29. Nicolò A., Massaroni C., Passfield L. Respiratory Frequency during Exercise: The Neglected Physiological Measure // *Front Physiol.* 2017. Vol. 11. №8. P. 922. DOI: 10.3389/fphys.2017.00922
30. Nijsure Y., Tay W.P., Gunawan E., Wen F., Yang Z., Guan YL., Chua AP. An impulse radio ultrawideband system for contactless noninvasive respiratory monitoring // *IEEE Trans Biomed Eng.* 2013. Vol. 60. N 6. P. 1509-17. DOI: 10.1109/TBME.2012.2237401.
31. Sanyal S., Nundy K.K. Algorithms for Monitoring Heart Rate and Respiratory Rate From the Video of a User's Face // *IEEE J Transl Eng Health Med.* 2018. № 6. P. 2700111. DOI: 10.1109/JTEHM.2018.2818687.
32. Schaefer M.S., Eikermann M. Contact-free respiratory monitoring using bed wheel sensors: a valid respiratory monitoring technique with significant potential impact on public health // *J Appl Physiol* (1985). 2019. Vol. 126. № 5. P. 1430-1431. DOI: 10.1152/jappphysiol.00198.2019.
33. Suzuki S., Matsui T., Kawahara H., Ichiki H., Shimizu J., Kondo Y., Gotoh S., Yura H., Takase B., Ishihara M. A non-contact vital sign monitoring system for ambulances using dual-frequency microwave radars // *Med Biol Eng Comput.* 2009. Vol. 47. № 1. P. 101-105. DOI: 10.1007/s11517-008-0408-x.
34. Takahashi Y., Gu Y., Nakada T., Abe R., Nakaguchi T. Estimation of Respiratory Rate from Thermography Using Respiratory Likelihood Index // *Sensors (Basel).* 2021. Vol. 21. № 13. P. 4406. DOI: 10.3390/s21134406.
35. Tan P., Xi Y., Chao S., Jiang D., Liu Z., Fan Y., Li Z. An Artificial Intelligence-Enhanced Blood Pressure Monitor Wristband Based on Piezoelectric Nanogenerator // *Biosensors (Basel).* 2022. Vol. 12. N 4. P. 234. DOI: 10.3390/bios12040234.
36. Uenoyama M., Matsui T., Yamada K., Suzuki S., Takase B., Suzuki S., Ishihara M., Kawakami M. Non-contact respiratory monitoring system using a ceiling-attached microwave antenna // *Med Biol Eng Comput.* 2006. Vol. 44. № 9. P. 835-40. DOI: 10.1007/s11517-006-0091-8.
37. Valenzuela A., Sibuet N., Hornero G., Casas O. Non-Contact Video-Based Assessment of the Respiratory Function Using a RGB-D Camera // *Sensors (Basel).* 2021. Vol. 21. № 16. P. 5605. DOI: 10.3390/s21165605.
38. Vasu V., Fox N., Heneghan C., Sezer S. Using the Lomb periodogram for non-contact estimation of respiration rates // *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2010. P. 2407-2410. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5626125.

References

1. Berlovskaja EE, Cherkasova OP, Ozheredov IA, Adamovich TV, Isajchev ES, Isajchev SA, Makurenkov AM, Varaksin AN, Gatilov SB, Kurenkov NI, Chernorizov AM, Shkurinov AP. Beskontaktnaja registracija funkcii dyhanija na osnove analiza IK-TGc-izobrazhenij lica cheloveka. *Komp'juternaja optika*. 2020;44(6):959-67. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-737. Russian.
2. Purtov KS, Sokolov PA, Kontorovich MB, Chistjakov AV, Kostousov VB, Kublanov VS. Analiz videoizobrazhenija cheloveka dlja opredelenija chastoty ego dyhanija // Konferencija molodyh uchenyh – 2017: materialy konferencii., Ekaterinburg, 2017. Russian.
3. Rumjancev AA, Shljahtov VN. Issledovanie parametrov vneshnego dyhanija u gimnastov vo vremja vypolnenija akrobaticeskikh uprazhnenij. Uchjonye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta: nauchno-teoreticheskij zhurnal. 2010;12 (70): 96-100 Russian.
4. Rumjancev A A, Shljahtov VN. Primenenie sovremennyh instrumental'nyh tehnologij v podgotovke gimnastov // Sovremennye tendencii razvitija jekonomiki i obrazovanija regiona: Materialy III Regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, Velikie Luki, 13–14 dekabrya 2018 goda. Velikie Luki: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju "Izdatel'stvo "Mir nauki", 2019. Russian.
5. Adamidi ES, Mitsis K, Nikita KS. Artificial intelligence in clinical care amidst COVID-19 pandemic: A systematic review. *Comput Struct Biotechnol J*. 2021;19:2833-50. DOI: 10.1016/j.csbj.2021.05.010.
6. Al-Khalidi FQ, Saatchi R, Burke D, Elphick H, Tan S. Respiration rate monitoring methods: a review. *Pediatr Pulmonol*. 2011;46(6):523-9. DOI: 10.1002/ppul.21416
7. Ali M, Elsayed A, Mendez A, Savaria Y, Sawan M. Contact and Remote Breathing Rate Monitoring Techniques: A Review. *IEEE Sens J*. 2021;21(13):14569-86. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3072607.
8. Apriono C, Muin F, Juwono FH. Portable Micro-Doppler Radar with Quadrature Radar Architecture for Non-Contact Human Breath Detection. *Sensors (Basel)*. 2021;21(17):5807. DOI: 10.3390/s21175807.
9. Bae S, Borac S, Emre Y, Wang J, Wu J, Kashyap M, Kang SH, Chen L, Moran M, Cannon J, Teasley ES, Chai A, Liu Y, Wadhwa N, Krainin M, Rubinstein M, Maciel A, McConnell MV, Patel S, Corrado GS, Taylor JA, Zhan J, Po MJ. Prospective validation of smartphone-based heart rate and respiratory rate measurement algorithms. *Commun Med (Lond)*. 2022;2:40. DOI: 10.1038/s43856-022-00102-x.
10. Bartula M, Tigges T, Muehlsteff J. Camera-based system for contactless monitoring of respiration. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2013. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610090.
11. Dou C, Huan H. Full Respiration Rate Monitoring Exploiting Doppler Information with Commodity Wi-Fi Devices. *Sensors*. 2021;21:3505.
12. Favilla R, Zuccala VC, Coppini G. Heart Rate and Heart Rate Variability From Single-Channel Video and ICA Integration of Multiple Signals. *IEEE J Biomed Health Inform*. 2019;23(6):2398-408. DOI: 10.1109/JBHI.2018.2880097.
13. Gu C, Wang G, Li Y, Inoue T, Li C. A Hybrid Radar-Camera Sensing System With Phase Compensation for Random Body Movement Cancellation in Doppler Vital Sign Detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2013;61(12):4678-88. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2288226.
14. Hernandez-Aguila M, Olvera-Cervantes JL, Perez-Ramos AE., Corona-Chavez A. Methodology for the determination of human respiration rate by using Doppler radar and Empirical Modal Decomposition. *Sci Rep*. 2022;12(1):8675. DOI: 10.1038/s41598-022-12726-z.
15. Hwang HS, Lee EC. Non-Contact Respiration Measurement Method Based on RGB Camera Using 1D Convolutional Neural Networks. *Sensors (Basel)*. 2021;21(10):3456. DOI: 10.3390/s21103456.
16. Iozza L, Lázaro J, Cerina L, Silvestri D, Mainardi L, Laguna P, Gil E. Monitoring breathing rate by fusing the physiological impact of respiration on video-photoplethysmogram with head movements. *Physiol Meas*. 2019;40(9):094002. DOI: 10.1088/1361-6579/ab4102.
17. Isono S, Nozaki-Taguchi N, Hasegawa M, Kato S, Todoroki S, Masuda S, Iida N, Nishimura T, Noto M, Sato Y. Contact-free unconstrained respiratory measurements with load cells under the bed in awake healthy volunteers: breath-by-breath comparison with pneumotachography. *J Appl Physiol (1985)*. 2019;126:1432-41. DOI: 10.1152/jappphysiol.00730.2018.
18. Jagadev P, Giri LI. Human respiration monitoring using infrared thermography and artificial intelligence. *Biomed Phys Eng Express*. 2020;6(3): 035007. DOI: 10.1088/2057-1976/ab7a54.
19. Kwon HM, Ikeda K, Kim SH, Thiele RH. Non-contact thermography-based respiratory rate monitoring in a post-anesthetic care unit. *J Clin Monit Comput*. 2021;35(6):1291-7. DOI: 10.1007/s10877-020-00595-8.
20. Lauteslager T, Maslik M, Siddiqui F, Marfani S, Leschziner GD, Williams AJ. Validation of a New Contactless and Continuous Respiratory Rate Monitoring Device Based on Ultra-Wideband Radar Technology. *Sensors (Basel)*. 2021;21(12):4027. DOI: 10.3390/s21124027.
21. Lee YC, Syakura A, Khalil MA. et al. A real-time camera-based adaptive breathing monitoring system. *Med Biol Eng Comput*. 2021;59:1285-98.
22. Li C, Lin J. Random Body Movement Cancellation in Doppler Radar Vital Sign Detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2008;56(12):3143-52. DOI: 10.1109/TMTT.2008.2007139.
23. Liu H, Allen J, Zheng D, Chen F. Recent development of respiratory rate measurement technologies. *Physiol Meas*. 2019;40(7):07TR01. DOI: 10.1088/1361-6579/ab299e.
24. Majumder S, Mondal T, Deen MJ. Wearable Sensors for Remote Health Monitoring. *Sensors (Basel)*. 2017;17(1):130. DOI: 10.3390/s17010130.

25. Massaroni C, Lo Presti D, Formica D, Silvestri S, Schena E. Non-Contact Monitoring of Breathing Pattern and Respiratory Rate via RGB Signal Measurement. *Sensors (Basel)*. 2019;19(12):2758. DOI: 10.3390/s19122758.
26. Matsui T, Yoshida Y, Kagawa M, Kubota M, Kurita A. Development of a practicable non-contact bedside autonomic activation monitoring system using microwave radars and its clinical application in elderly people. *J Clin Monit Comput*. 2013;27(3):351-6. DOI: 10.1007/s10877-013-9448-3.
27. Mechanic OJ, Persaud Y, Kimball AB. *Telehealth Systems*. 2022. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. 2023.
28. Nicolo A, Massaroni C, Schena E, Sacchetti M. The Importance of Respiratory Rate Monitoring: From Healthcare to Sport and Exercise. *Sensors (Basel)*. 2015; 9(21):6396. DOI: 10.3390/s20216396
29. Nicolò A, Massaroni C, Passfield L. Respiratory Frequency during Exercise: The Neglected Physiological Measure. *Front Physiol*. 2017;11(8):922. DOI: 10.3389/fphys.2017.00922
30. Nijsure Y, Tay WP, Gunawan E, Wen F, Yang Z, Guan YL, Chua AP. An impulse radio ultrawideband system for contactless noninvasive respiratory monitoring. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2013;60(6):1509-17. DOI: 10.1109/TBME.2012.2237401.
31. Sanyal S, Nundy KK. Algorithms for Monitoring Heart Rate and Respiratory Rate From the Video of a User's Face. *IEEE J Transl Eng Health Med*. 2018;6:2700111. DOI: 10.1109/JTEHM.2018.2818687.
32. Schaefer MS, Eikermann M. Contact-free respiratory monitoring using bed wheel sensors: a valid respiratory monitoring technique with significant potential impact on public health. *J Appl Physiol (1985)*. 2019;126(5):1430-1. DOI: 10.1152/jappphysiol.00198.2019.
33. Suzuki S, Matsui T, Kawahara H, Ichiki H, Shimizu J, Kondo Y, Gotoh S, Yura H, Takase B, Ishihara M. A non-contact vital sign monitoring system for ambulances using dual-frequency microwave radars. *Med Biol Eng Comput*. 2009;47(1):101-5. DOI: 10.1007/s11517-008-0408-x.
34. Takahashi Y, Gu Y, Nakada T, Abe R, Nakaguchi T. Estimation of Respiratory Rate from Thermography Using Respiratory Likelihood Index. *Sensors (Basel)*. 2021;21(13):4406. DOI: 10.3390/s21134406.
35. Tan P, Xi Y, Chao S, Jiang D, Liu Z, Fan Y, Li Z. An Artificial Intelligence-Enhanced Blood Pressure Monitor Wristband Based on Piezoelectric Nanogenerator. *Biosensors (Basel)*. 2022;12(4):234. DOI: 10.3390/bios12040234.
36. Uenoyama M, Matsui T, Yamada K, Suzuki S, Takase B, Suzuki S, Ishihara M, Kawakami M. Non-contact respiratory monitoring system using a ceiling-attached microwave antenna. *Med Biol Eng Comput*. 2006;44(9):835-40. DOI: 10.1007/s11517-006-0091-8.
37. Valenzuela A, Sibuet N, Hornero G, Casas O. Non-Contact Video-Based Assessment of the Respiratory Function Using a RGB-D Camera. *Sensors (Basel)*. 2021;21(16):5605. DOI: 10.3390/s21165605.
38. Vasu V, Fox N, Heneghan C, Sezer S. Using the Lomb periodogram for non-contact estimation of respiration rates. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2010. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5626125.

Библиографическая ссылка:

Гаранин А.А., Шипунов И.Д., Рубаненко А.О., Санникова Н.О. Бесконтактные методы измерения частоты дыхания: (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2023. №5. Публикация 1-9. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2023-5/1-9.pdf> (дата обращения: 13.10.2023). DOI: 10.24412/2075-4094-2023-5-1-9. EDN DHMRTF*

Bibliographic reference:

Garanin AA, Shipunov ID, Rubanenko AO, Sannikova NO. Beskontaktnye metody izmereniya chastoty dyhaniya: (obzor literatury) [Methods of non-contact respiratory rate measurement: (literature review)]. *Journal of New Medical Technologies, e-edition*. 2023 [cited 2023 Oct 13];5 [about 9 p.]. Russian. Available from: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2023-5/1-9.pdf>. DOI: 10.24412/2075-4094-2023-5-1-9. EDN DHMRTF

* номера страниц смотреть после выхода полной версии журнала: URL: <http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2023-5/e2023-5.pdf>

**идентификатор для научных публикаций EDN (eLIBRARY Document Number) будет активен после загрузки полной версии журнала в eLIBRARY