

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-130-152>



УДК 519.81

Определение центральной температуры тела при предсменном медицинском осмотре

В. В. Савченко¹ ✉, В. А. Сясько¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева
Московский пр-т, д. 19, г. Санкт-Петербург 190005, Российская Федерация

✉ e-mail: sav4enk0@mail.ru

Резюме

Цель исследования – разработка методики косвенной оценки центральной температуры тела по результатам измерений частоты сердечных сокращений и температуры ладоней с использованием комплекта технических средств в процессе прохождения теста сложной зрительно-моторной реакции.

Методы. В процессе разработки была проведена серия обследований с последовательным измерением ЦТТ медицинским термометром и КТС, используемых в разрабатываемой методике измерения. Полученные результаты измерений были обобщены регрессионным анализом, на основе полученных обобщений был синтезирован набор данных для обучения регрессионной модели алгоритма машинного обучения «случайный лес». Разработанная методика измерений верифицирована в соответствии с требованиями, предъявляемыми к измерению ЦТТ при проведении предсменных медицинских осмотрах.

Результаты. В результате проведенных исследований и выявленных параметров (препроцессинга данных, синтеза данных и алгоритма регрессионной модели) была разработана методика косвенной оценки ЦТТ, определены ее точностные характеристики.

Закключение. Разработанная методика соответствует требованиям нормативных документов, предъявляемым к измерению ЦТТ при прохождении предсменных медицинских осмотров. Методика применяется в диапазоне температуры окружающей среды от 18 до 35°C, диапазон измерения ЦТТ от 35 до 42°C, абсолютная погрешность измерения ЦТТ $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Методика аттестована и зарегистрирована Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Номер свидетельства об аттестации методики (метода) измерений – 2207/2411-(RA.RU.310494)-2023, номер в реестре – ФР.1.32.2024.47935. С использованием методики разработано специальное программное обеспечение «Оценка функционального состояния». СПО зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) и внесено в реестр программ для ЭВМ. Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ – 2024612210. Разработанное в соответствии с методикой СПО используется в программно-аппаратном комплексе, предназначенном для проведения предсменных медицинских осмотров.

Ключевые слова: центральная температура тела; температура ладоней; температура в подмышечной впадине; частота сердечных сокращений; алгоритм ЕСТемр; регрессионный анализ; методы машинного обучения.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Савченко В. В., Сясько В. А. Определение центральной температуры тела при предсменном медицинском осмотре // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 130–152. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-130-152>

Поступила в редакцию 17.04.2025

Подписана в печать 12.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Determination of core body temperature during pre-shift medical examination

Vyacheslav V. Savchenko¹, Vladimir A. Syasko¹ ✉

¹ D.I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky Ave., St. Petersburg 190005, Russian Federation

✉ e-mail: sav4enk0@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for indirect assessment of core body temperature based on measurements of heart rate and palm temperature using a technical equipment kit during a complex visual-motor reaction test.

Methods. During the development process, a series of examinations were conducted with sequential measurements of CBT using a medical thermometer and the TEK employed in the proposed measurement method. The obtained measurement results were processed using regression analysis, and based on the derived generalizations, a dataset was synthesized for training a machine learning regression model using the "random forest" algorithm. The developed measurement method was verified in accordance with the requirements for CBT assessment during pre-shift medical examinations.

Results. As a result of the conducted research and the identified parameters (data preprocessing, data synthesis and the regression model algorithm), a technique for indirect assessment of CTT was developed, and its accuracy characteristics were determined.

Conclusion. The developed method complies with the regulatory requirements for CBT measurement during pre-shift medical examinations. The method is applicable within an ambient temperature range of 18 to 35°C, measures CBT in the range of 35 to 42°C, and has an absolute measurement error of $\pm 0.1^\circ\text{C}$. The method has been certified and registered by the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart). The certification number for the measurement method is 2207/2411-(RA.RU.310494)-2023, and the registry entry number is FR.1.32.2024.47935. Based on this method, specialized software (SSW) "Functional State Assessment" was developed. The SSW is registered with the Federal Service for Intellectual Property (Rospatent) and included in the register of computer programs. The state registration number for the computer program is 2024612210. The SSW, developed in accordance with the proposed method, is used in a hardware-software complex designed for conducting pre-shift medical examinations.

Keywords: core body temperature; palm temperature; axillary temperature; heart rate; ECTemp algorithm; regression analysis; machine learning methods.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Savchenko V.V., Syasko V.A. Determination of core body temperature during pre-shift medical examination. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(2):130–152

Введение

Согласно части 2 статьи 46 Федерального закона «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации»¹, одним из видов медицинских осмотров являются предсменные медицинские осмотры, проводимые перед началом рабочего дня (смены) в целях выявления признаков воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов, состояний и заболеваний, препятствующих выполнению трудовых обязанностей.

Основные категории работников, которые обязаны проходить медицинский осмотр в начале рабочего дня: специалисты, в чьи трудовые обязанности входит подземная работа²; профессиональные водители³; машинисты различных видов железнодорожного транспорта и их помощники⁴; лица, занятые на работах, носящих опасный характер, в число которых входят некоторые специалисты атомной и химической промышленности⁵.

¹ Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации: Федеральный закон от 21.11.2011 г. № 323-ФЗ: [ред. от 24.07.2023 г.]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/ (дата обращения: 20.03.2025).

² Трудовой кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 30.12.2001 г. № 197-ФЗ: [ред. от 07.04.2025 г.]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 20.03.2025).

³ О безопасности дорожного движения: Федеральный закон от 10 декабря 1995 г. № 196-ФЗ. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=490068> (дата обращения: 20.03.2025).

⁴ Об утверждении перечня профессий работников, производственная деятельность которых непосредственно связана с движением поездов и маневровой работой на железнодорожном транспорте общего пользования, подлежащих обязательным предрейсовым или предсменным медицинским осмотрам: приказ Министерства транспорта Российской

Федерации от 28.03. 2007 г. № 36. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=106112> (дата обращения: 20.03.2025).

⁵ Об утверждении требований к проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии, порядка их проведения, перечня медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии и перечня должностей работников объектов использования атомной энергии, на которые распространяются данные противопоказания, а также формы медицинского заключения о наличии (отсутствии) медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии: приказ Министерства здравоохранения РФ от 28.07.2020 г. № 749н. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=10688> (дата обращения: 20.03.2025).

В перечень основных физиологических показателей при проведении предсменных медицинских осмотров входят: частота сердечных сокращений (ЧСС), измерение температуры тела¹. В качестве психофизиологических показателей используются: вариабельность сердечного ритма (измерение 3–5 мин) для оценки общего функционального состояния организма, время и количество ошибок сложной зрительно-моторной реакции (СЗМР) для оценки уровня работоспособности².

Автоматизация предсменных медицинских осмотров является актуальной задачей. Решение этой задачи позволит сократить время проведения таких

медосмотров за счет автоматизации рутинных процессов измерения показателей, увеличить достоверность получаемых данных с помощью использования аппаратно-программных средств измерения, исключающих человеческий фактор, вести компьютерный учет проведенных измерений при помощи электронных журналов медицинских осмотров.

В статье описывается измерение ЧСС и температуры тела при прохождении обследуемым теста СЗМР (длительность измерения 3–5 мин) с помощью комплекта технических средств (КТС): компьютера, монитор и два джойстика. В джойстики встроены металлические

¹ Об утверждении порядка и периодичности проведения предсменных, предрейсовых, послесменных, послерейсовых медицинских осмотров, медицинских осмотров в течение рабочего дня (смены) и перечня включаемых в них исследований: приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 30.05.2023 г. № 266Н. URL: https://rabota-bryanskobl.ru/cms_data/usercontent/regionaleditor/файлы/охрана%20труда/федеральное%20законодательство/приказ%20минздрава%20рф%20от%2030.05.2023%20н%20266н%20об%20утверждении%20порядка%20и%20периодичности%20проведения.pdf (дата обращения: 20.03.2025); Об утверждении порядка проведения обязательных предрейсовых или предсменных медицинских осмотров на железнодорожном транспорте»: приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 12.01. 2021 г. № 4. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=383028> (дата обращения: 20.03.2025).

² Об утверждении требований к проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии, порядка их проведения, перечня медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии и перечня должностей работников объектов использования атомной энергии, на которые распространяются данные противопоказания, а также формы медицинского заключения о наличии (отсутствии) медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии: приказ Министерства здравоохранения РФ от 28.07.2020 г. № 749Н. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=10688> (дата обращения: 20.03.2025).

пластины для регистрации температуры ладоней и электрической активности сердца (ЭАС). Сигнал ЭАС используется для расчета ЧСС. Такой подход позволяет существенно сократить общее время обследования (несколько основных параметров регистрируются одновременно) и увеличить достоверность результатов (расчет параметров и запись результатов в память компьютера осуществляется в автоматическом режиме без непосредственного участия медицинского работника).

При измерении температуры тела в медицинских целях традиционно термометр размещают в трех положениях: 1) аксиллярно – в подмышечной впадине (в России), нормальная температура 36,6–37,2°C, средняя 36,6°C; 2) орально (в англоязычных странах), нормальная температура 36,4–37,2°C, средняя 36,8°C; 3) ректально (в Европе) нормальная температура 36,8–37,6°C, средняя 37,5°C [1; 2].

Все три положения градусника обеспечивают измерение значения температуры, максимально близкой к так называемой центральной температуре тела (ЦТТ). Другие названия ЦТТ: ядерная температура, базальная температура или температура внутренних органов. В норме ЦТТ составляет 36,1–37,8°C [3]. Средней нормальной температурой принято считать температуру крови в правом желудочке сердца, где она равна примерно 37°C [2].

Аксиллярная, оральная, ректальная и центральная температура различаются

между собой, но хорошо коррелируют [1].

Кроме этого, в ряде случаев температуру тела измеряют в ухе (наиболее близкое неинвазивное измерение ЦТТ), но такие измерения редки в повседневной практике и встречаются в основном в клинических или лабораторных условиях [1]. Также электронные термометры измеряют температуру на лбу, смарт-часы измеряют температуру на запястье [4; 5]. Оба этих метода требуют пересчета измеренной температуры с помощью специально разработанных алгоритмов к значениям одного из трех традиционных методов измерения, в зависимости от региона. Пересчет необходимо выполнять для сравнения конечными пользователями значений измеренной температуры с диапазонами норм, к которым они привыкли.

Важной является температурная схема тела – распределение показателей температуры по поверхности кожи и разным органам называется температурной схемой тела. При этом следует различать ЦТТ – «ядро» и температуру поверхности тела – «оболочку». Температура «ядра» поддерживается на постоянном уровне, в нем образуется большая часть тепла. В условиях холода объем «ядра» уменьшается, а температура оболочки при этом понижается. В условиях тепла «ядро» увеличивает свой объем, а температура оболочки повышается [2].

Температура ладоней и пальцев рук относится к температуре оболочки и в норме составляет 24–36°C (средняя

$33 \pm 1,2^\circ\text{C}$) [6]. Температура ладоней зависит от колебания кровотока в дистальных отделах верхних конечностей [7] и, как следствие, в отличие от ЦТТ зависит от температуры окружающей среды [8]. Эти особенности усложняют использование температуры ладоней для прогнозирования ЦТТ. Абсолютная погрешность определения ЦТТ с помощью температуры ладоней по разным данным составляет от $\pm 1,2$ до $\pm 1,5^\circ\text{C}$ [9].

В последние десятилетия было предпринято несколько попыток неинвазивного прогнозирования ЦТТ, используя один или несколько физиологических параметров (например, ЧСС или температуру поверхности тела в разных точках) [10; 11]. Алгоритм Estimated Core Temperature (ECTemp) был

разработан для оценки ЦТТ только на основе последовательных наблюдений ЧСС с использованием фильтра Калмана и линейной регрессии [12] или логистической регрессии [13]. Результаты апробации алгоритма показывают, что ЧСС с достаточно высокой эффективностью можно использовать для вычисления ЦТТ. Абсолютная погрешность определения ЦТТ с помощью алгоритма ECTemp составляет от $\pm 0,3$ до $\pm 0,6^\circ\text{C}$ в зависимости от диапазона, погрешность выше при определении высоких значений ЦТТ [12; 13].

В России все нормативные документы для диапазона температуры тела «в норме» при приведении предменных медицинских осмотров разработаны для измерения в подмышечной впадине¹.

¹ Об утверждении требований к проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии, порядка их проведения, перечня медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии и перечня должностей работников объектов использования атомной энергии, на которые распространяются данные противопоказания, а также формы медицинского заключения о наличии (отсутствии) медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии: приказ Министерства здравоохранения РФ от 28.07.2020 г. № 749н. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=10688> (дата обращения: 20.03.2025); Об утверждении порядка и периодичности

проведения предменных, предрейсовых, послесменных, послерейсовых медицинских осмотров, медицинских осмотров в течение рабочего дня (смены) и перечня включаемых в них исследований: приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 30.05.2023 г. № 266н. URL: https://rabota-bryanskobl.ru/cms_data/usercontent/regionaleditor/файлы/охрана%20труда/федеральное%20законодательство/приказ%20минздрава%20рф%20от%2030.05.2023%20п%20266н%20об%20утверждении%20порядка%20и%20периодичности%20проведения.pdf (дата обращения: 20.03.2025); Об утверждении порядка проведения обязательных предрейсовых или предменных медицинских осмотров на железнодорожном транспорте: приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 12.01.2021 г. № 4. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=383028> (дата обращения: 20.03.2025).

Согласно требованиям к проведению медицинских осмотров, измерение температуры тела человека должно проводиться в диапазоне от 35,0 до 42,0°C с пределом допустимой абсолютной погрешности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ¹ на всем диапазоне измерений и может проводиться при температуре окружающего воздуха от 18 до 35°C².

Следовательно, для принятия решения о допуске или не допуске к выполнению рабочих обязанностей на основе измерения температуры тела с ладоней необходимо разработать алгоритм пересчета значения этой температуры в температуру подмышечной впадины. Однако на основе анализа данных литературных источников становится очевидно, что для достижения косвенного измерения ЦТТ с необходимой абсолютной погрешностью, равной $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ измерений, только температуры ладоней недостаточно, а еще одним потенциально подходящим для косвенного измерения ЦТТ параметром является ЧСС.

Материалы и методы

Объем проведенных исследований

Для обоснования и разработки алгоритма пересчета температуры и ЧСС, полученных от ладоней, в ЦТТ была

проведена серия обследований. Во время обследований проводили последовательные измерения: 1) температуры в подмышечной впадине медицинским термометром; 2) температуры ладоней и ЧСС с помощью КТС (рис. 1, а).

Для измерения температуры в подмышечной впадине прямым методом использовали термометр медицинский стеклянный «ИМПЭКС-МЕД» с термометрической жидкостью (номер в ФИФОЕИ: 52345-12), со следующими метрологическими характеристиками: диапазон измерений от 35 до 42°C, пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Время измерения от 6 до 10 мин, результат измерения заносили в протокол обследований.

После измерения температуры медицинским термометром проводили измерения с помощью КТС. Термометр в составе КТС (детектор касания и регистрации температуры, зав. № 220110), сертификат калибровки № 22-43546 от 16.12.2022 г. со следующими метрологическими характеристиками: диапазон измерений температуры тела человека от 18 до 42°C, пределы допускаемой погрешности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ на всем диапазоне измерений.

¹ ГОСТ 31516-2012. Термометры медицинские максимальные стеклянные. Введ. 2015-01-01. М.: Ствндартинформ, 2013. 16 с.

² Об утверждении санитарных правил СП 2.1.3678-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к эксплуатации помещений, зданий, сооружений, оборудования и транспорта, а также условиям деятельности

хозяйствующих субъектов, осуществляющих продажу товаров, выполнение работ или оказание услуг»: постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 24.12.2020 г. № 44: [зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 г. № 61953]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275590> (дата обращения: 20.03.2025).

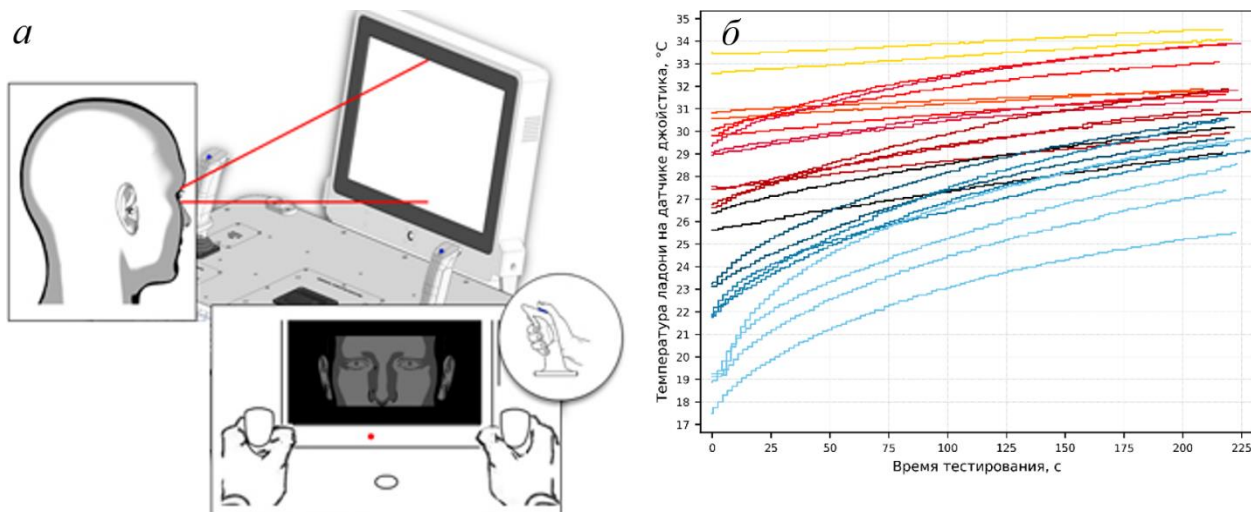


Рис. 1. КТС для выполнения теста СЗМР с одновременной регистрацией температуры ладоней и ЭАС: а – общий вид КТС; б – зависимость динамики изменения температуры ладони на датчике джойстика от начальной температуры и времени тестирования при ЦТТ, равной 36,8°C, у одного обследуемого

Fig. 1. TEK for performing the CVMR test with simultaneous recording of palm temperature and EAS: а – general view of the TEK; б – dependence of palm temperature dynamics on the joystick sensor on initial temperature and testing time at a CBT of 36,8°C in one subject

При выполнении измерений на КТС обследуемый берет в руки джойстики, в которые встроены металлические пластины с интегральными датчиками температуры и ЭАС, и не отпускает их все время тестирования (рис. 1, а). В случае если обследуемый отпускает джойстики, КТС на основе анализа сигнала ЭАС детектирует это событие, и тестирование начинают заново. Во время тестирования в разных частях экрана случайным образом предъявляют красные и синие круги. Обследуемый согласно инструкции нажимает на кнопки правого (красный круг) или левого (синий круг) джойстиков. Длительность измерения зависит от времени прохождения обследуемым теста СЗМР и составляет от 3,5 до 5 мин.

По описанной схеме было проведено 868 измерений. В измерениях приняли участие 21 человек (13 мужчин и 8

женщин) в возрасте от 20 до 60 лет. Диапазон температуры подмышечной впадины измеренной медицинским термометром составил от 35,0 до 38,9°C. Диапазон температуры на датчиках джойстиков в начале измерения составил от 18 до 34°C. Диапазон ЧСС при измерении температуры составил от 57 до 117 уд./мин.

Отечественный датчик температуры, используемый в джойстиках, показывает не мгновенную температуру в единицу времени, а динамику температуры (процесс нагрева) металлической пластины, контактирующей с ладонью обследуемого во время прохождения тестирования. На рисунке 1, б представлены примеры записей динамики изменения температуры ладони на датчике правого джойстика при прохождении 25 тестирований на КТС одним обследуемым при температуре подмышечной

впадины, равной $36,8^{\circ}\text{C}$. На рисунке 1, б видно, что значения температуры на датчике джойстика в начале теста могут сильно отличаться в разных обследованиях, это связано с тем, что датчик реагирует на изменения температуры окружающей среды. Кроме этого, за время теста значения температуры ладони на датчике не успевают выйти на плато.

Представленные особенности работы датчика температуры, используемого в КТС, указывают на то, что алгоритм измерения ЦТТ не может строиться на пересчете абсолютного значения температуры ладони на датчике джойстика в ЦТТ. Алгоритм пересчета может быть построен на поиске закономерности между приростом температуры в единицу времени в зависимости от текущей температуры ладони на датчике джойстика и ЦТТ обследуемого.

Использование для пересчета фильтра Кальмана, как в работах [10; 12; 13], в данном случае также не подходит, так как в процессе измерения меняется температура (среднее значение и дисперсия) не только измеряемого объекта (ладони), но и измеряющего объекта (металлической пластины). При таких условиях отдельную линейную модель с использованием фильтра Кальмана необходимо построить для каждого значения температуры на датчике джойстика, что является чрезвычайно сложной задачей.

Кроме этого, очевидно, что изменение температуры на датчике джойстика при измерении зависит от множества факторов: температуры окружающей среды, разницы между температурой ладони и температурой металлической

пластины датчика. Температура ладони также нелинейно связана с ЦТТ [2; 7] и, как следствие, с температурой подмышечной впадины.

По этим причинам для достижения необходимой абсолютной погрешности измерения, равной $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, при пересчете в ЦТТ наряду с температурой ладони на датчике джойстика целесообразно использовать данные ЧСС на основании результатов опубликованных исследований [10; 12; 13] (в частности, алгоритма ECTemp).

С учетом вышесказанного для разработки алгоритма измерения ЦТТ по результатам оценки ЧСС и температуры ладоней во время прохождения теста СЗМР представляется возможным использование комбинированных методов машинного обучения как наиболее мощных и эффективных реализаций нелинейных регрессионных моделей на текущий момент времени [14].

Представленные закономерности указывают на то, что разработка алгоритма расчета ЦТТ сводится к решению следующих задач:

1. Получить набор данных для создания регрессионной модели. Зависимая переменная регрессионной модели – ЦТТ, измеренная в подмышечной впадине (диапазон от 35 до 42°C). Независимые переменные:

- температура ладони на датчике джойстика (диапазон от 18 до 35°C);
- прирост температуры на датчике джойстика за единицу времени;
- ЧСС в этот момент времени.

2. Выявить и систематизировать закономерности:

– прироста температуры на датчике джойстика в зависимости от текущей температуры ладони на датчике и температуры в подмышечной впадине;

– величины ЧСС в зависимости от температуры в подмышечной впадине.

3. На основе выявленных закономерностей синтезировать набор данных для обучения алгоритма регрессионной модели. Данные для обучения должны содержать все возможные сочетания зависимой переменной и независимых переменных во всех необходимых диапазонах.

4. Выбрать алгоритм машинного обучения для регрессионной модели и обучить его синтезированным набором данных.

5. Провести валидацию алгоритма. Проверить результаты работы алгоритма на соответствие заявленной абсолютной погрешности измерения ЦТТ на реальных данных.

Предварительная обработка данных записей обследований

Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) КТС выбрана равной 250 Гц, что обусловлено необходимой точностью распознавания RR интервалов в сигнале ЭАС. Данные датчика температуры также оцифровываются АЦП с частотой 250 Гц, однако сам датчик обновляет значения температуры раз в 2 с, при этом исходная запись сигнала температуры на датчике джойстика до предварительной обработки имеет ступенчатую структуру.

На основе результатов предварительных исследований единицей времени для расчета ЦТТ в регрессионной модели была установлена 1 с (1 Гц). В соответствии с этой настройкой записи данных 868 измерений были пересчитаны, последовательность действий при пересчете представлена ниже (табл. 1).

Таблица 1. Последовательность предварительной обработки записей температуры ладоней и ЭАС

Table 1. Preprocessing of records palm temperature and electrical activity of heart

Предобработка записей температуры ладоней (отдельно для левого и правого джойстика)	Предобработка записей сигнала ЭАС
Запись значений температуры с частотой 250 Гц, значения температуры обновляются раз в 2 с	Запись ЭАС с частотой 250 Гц; фильтрация сигнала ЭАС в диапазоне от 1 до 30 Гц; распознавание R-зубцов; расчет RR-интервалов; расчет ЧСС по RR-интервалам
Интерполяция значений температуры с частотой 250 Гц	Интерполяция значений ЧСС с частотой 250 Гц
Усреднение значений температуры за 1 с – T_j	Усреднение значений ЧСС за 1 с – HR
Вычисление разницы между соседними односекундными интервалами, прирост температуры T_{jd}	
Формирование строки данных за 1 с. Независимые переменные в строке: 1) температура ладони на датчике T_j ; 2) прирост температуры на датчике T_{jd} ; 3) ЧСС HR . Зависимая переменная в строке: температура в подмышечной впадине, ЦТТ – T_B (из протокола обследований)	

Результатом предварительной обработки является объединенная таблица данных 868 измерений, разбитых на одnoseкундные отрезки. Столбцы таблицы: температура ладони на датчике, прирост температуры на датчике, ЧСС, температура в подмышечной впадине (ЦТТ). Строки таблицы: одnoseкундные отрезки, синхронизированные по времени.

Поиск закономерностей прироста температуры на датчике джойстика в зависимости от текущей температуры ладони на датчике и температуры в подмышечной впадине

Строки объединенной таблицы данных были разбиты на диапазоны по значению температуры ладони на датчике джойстика с шагом в 1°C . Для каждого диапазона методом линейной регрессии были найдены коэффициенты линейных уравнений (1), усредняющих прямых прироста температуры в зависимости от значения температуры в подмышечной впадине (рис. 2, б).

$$T_{Jd} = k \cdot T_B + b \text{ для } T_{Jn} \in [n; n+1), \\ n \in [18; 34], \quad (1)$$

где T_{Jd} – прирост температуры на датчике джойстика за 1 с, $^\circ\text{C}$; T_B – температура в подмышечной впадине, $^\circ\text{C}$; k – найденный вес линейной модели; b – найденное смещение линейной модели; T_J – температура ладони на датчике джойстика.

Пример расчета коэффициентов линейного уравнения для диапазона T_J , равного 31°C , представлен на рисунке 2, а. В соответствии с данными, полученными в результате измерений, были найдены коэффициенты 17 линейных уравнений (1) для диапазонов T_J от 18 до 34°C с шагом 1°C (рис. 2, в и 2, г). Графики значений коэффициентов линейных уравнений были интерполированы в точках, в которых значения графиков отклоняются от наблюдаемой тенденции.

На рисунке 2, б видно, что величина T_{Jd} зависит от разницы между температурой ладони обследуемого (связана с температурой в подмышечной впадине) и температурой металлической пластины датчика на джойстике. Температура ладони, в свою очередь, зависит от ЦТТ (измеренной в подмышечной впадине) и температуры металлической пластины. Эти взаимосвязи выражаются в том, что величина T_{Jd} растет по мере увеличения разницы между температурами ладони (температура подмышечной впадины) и металлической пластины. Однако увеличение T_{Jd} происходит до определенного момента, после которого с увеличением разницы между температурой ладони и пластины величина T_{Jd} начинает уменьшаться. Такое изменение величины T_{Jd} связано с изменением (уменьшением) кровотока в ладони, вызванного соприкосновением с холодной поверхностью.

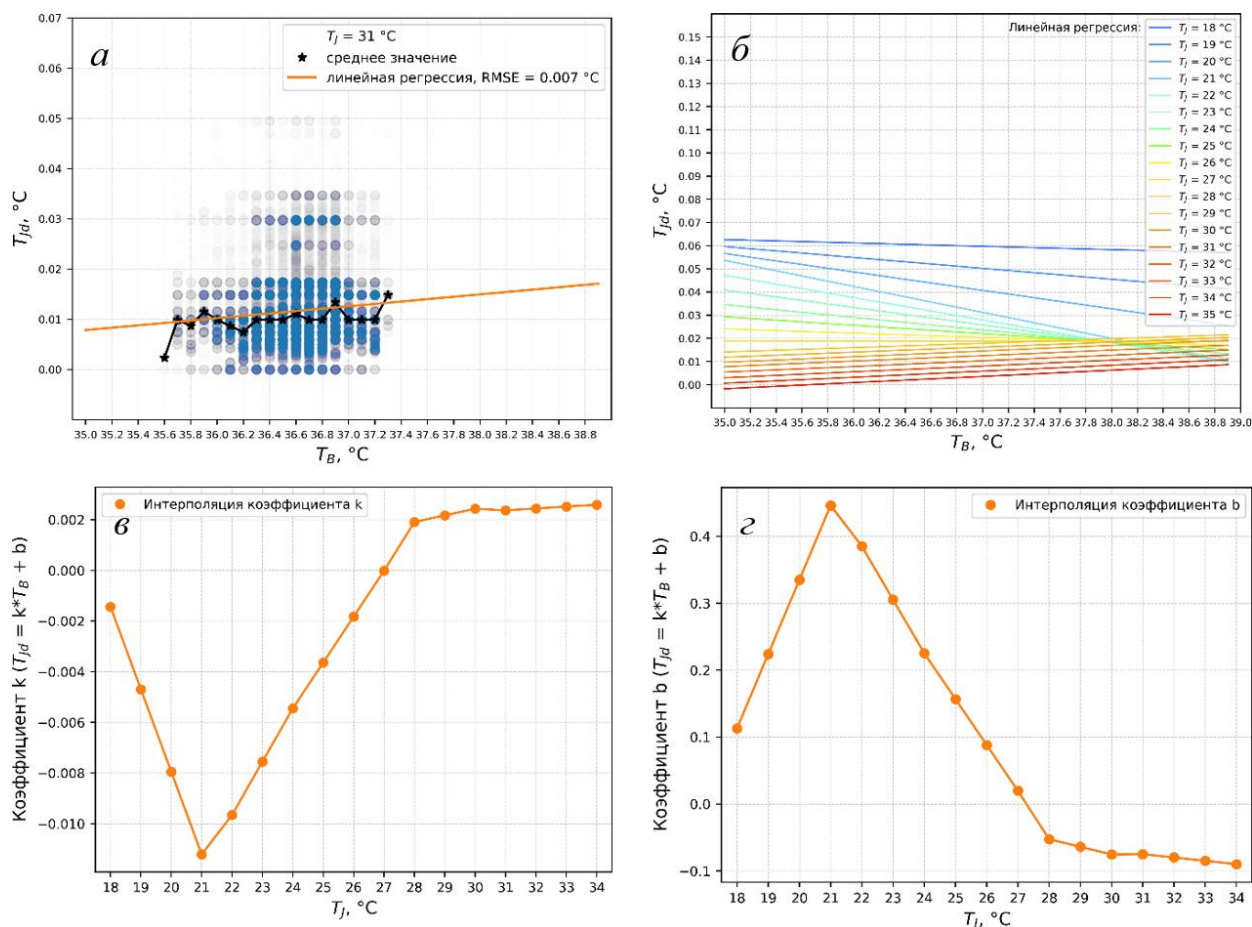


Рис. 2. Расчет коэффициентов линейных уравнений усредняющих прямых T_{Jd} в зависимости от T_B для разных диапазонов T_J : а – пример расчета для $T_J = 31$ °C; б – прямые прироста T_{Jd} для разных диапазонов; в и г – графики коэффициентов k и b для разных диапазонов

Fig. 2. Calculation of coefficients for linear equations of averaging lines T_{Jd} depending on T_B for different T_J ranges: а – example of calculation for $T_J = 31$ °C; б – T_{Jd} increment lines for different ranges; в and г – plots of coefficients k and b for different ranges)

Полученные результаты совпадают с результатами, описанными в [8].

Поиск закономерности величины ЧСС в зависимости от температуры в подмышечной впадине

Выявленная зависимость ЧСС (HR) от T_B представлена ниже (рис. 3). Величина HR (синие точки) взаимосвязана с T_B : чем выше T_B , тем выше HR . Зависимость стремится к сигмовидной форме (черная кривая усредненных значений HR).

Для синтеза данных зависимости величины HR от T_B было использовано преобразованное уравнение логистической регрессии (2) алгоритма ЕСTemp [13] (оранжевая кривая на рис. 3).

$$HR = A + \frac{K - A}{(1 + 0,06e^{-0,89(T_B - M)})^{1/0,07}}, \quad (2)$$

где HR – ЧСС, уд./мин; T_B – температура в подмышечной впадине, °C; A (минимальная ЧСС) = 41 уд./мин; K (максимальная ЧСС) = 140 уд./мин; M (средняя ЦТТ) = 37,1 °C.

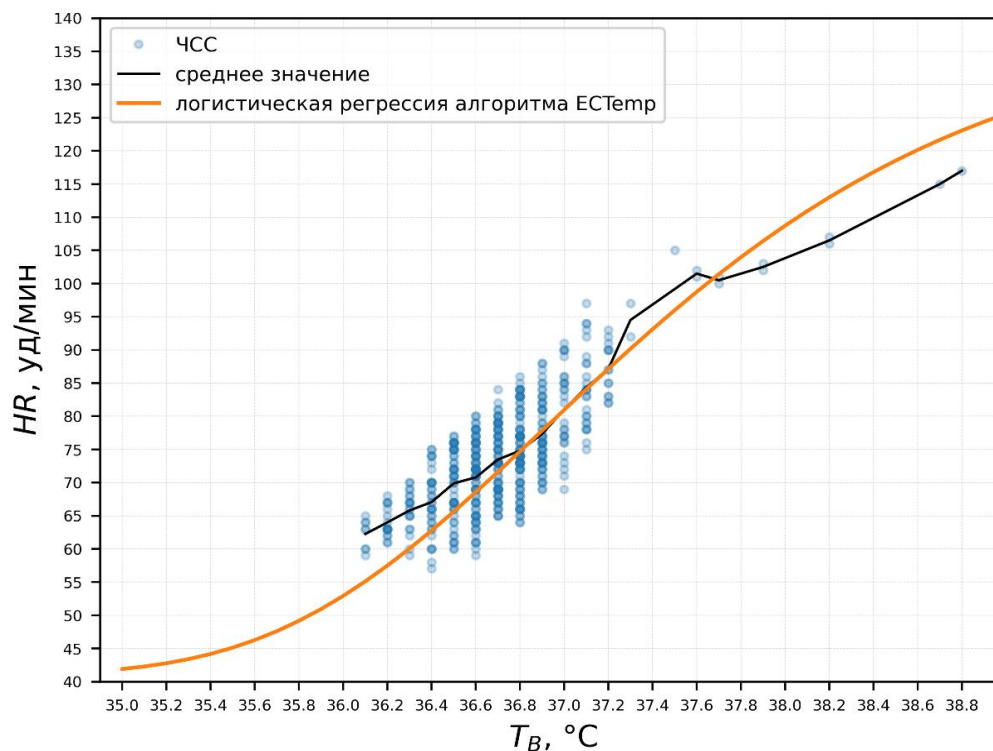


Рис. 3. Функциональная зависимость $HR = f(T_B)$

Fig. 3. Functional relationship $HR = f(T_B)$

Оригинальная логистическая функция алгоритма ECTemp отражает зависимость ЧСС от ЦТТ, зарегистрированной с помощью термометрической таблетки в условиях выполнения высокой физической нагрузки [12; 13]. В настоящем исследовании ЦТТ измеряется с помощью медицинского термометра в подмышечной впадине в сидячем положении с минимизацией движений, не связанных с проведением измерения. В соответствии с этими различиями коэффициенты уравнения (2) были преобразованы на основе данных измерений, полученных при разработке текущей методики. Было уменьшено среднее значение ЦТТ (было 37,84, стало 37,1°C) и максимальное значение ЧСС (было 193 стало 140 уд./мин). На рисунке 3 видно, что после преобразования коэффициентов

сигмоида алгоритма ECTemp хорошо аппроксимирует результаты измерений, полученные при разработке методики, и с ее помощью можно синтезировать данные для обучения регрессионной модели.

Синтез данных для обучения алгоритма регрессионной модели

На основе синтезированных линейной регрессией (1) данных T_{Jd} , в зависимости от значений T_B , для разных диапазонов T_J и синтезированных логистической регрессией (2) данных HR , в зависимости от значений T_B , был собран набор данных со всеми возможными комбинациями для обучения алгоритма регрессионной модели. Зависимая переменная регрессионной модели: T_B , диапазон от 35,0 до 42,0°C с шагом 0,1°C. Независимые переменные регрессион-

ной модели: 1) T_J , диапазон от 18 до 35°C с шагом 0,1°C; 2) T_{Jd} , диапазон от -0,02 до 0,06°C; 3) HR , диапазон от 41 до 140 уд./мин. Было создано 241542 строки

данных, при этом один набор данных был создан с $T_{Jd} = 0$ для обучения алгоритма регрессионной модели только на основе значений ЧСС (рис. 4).

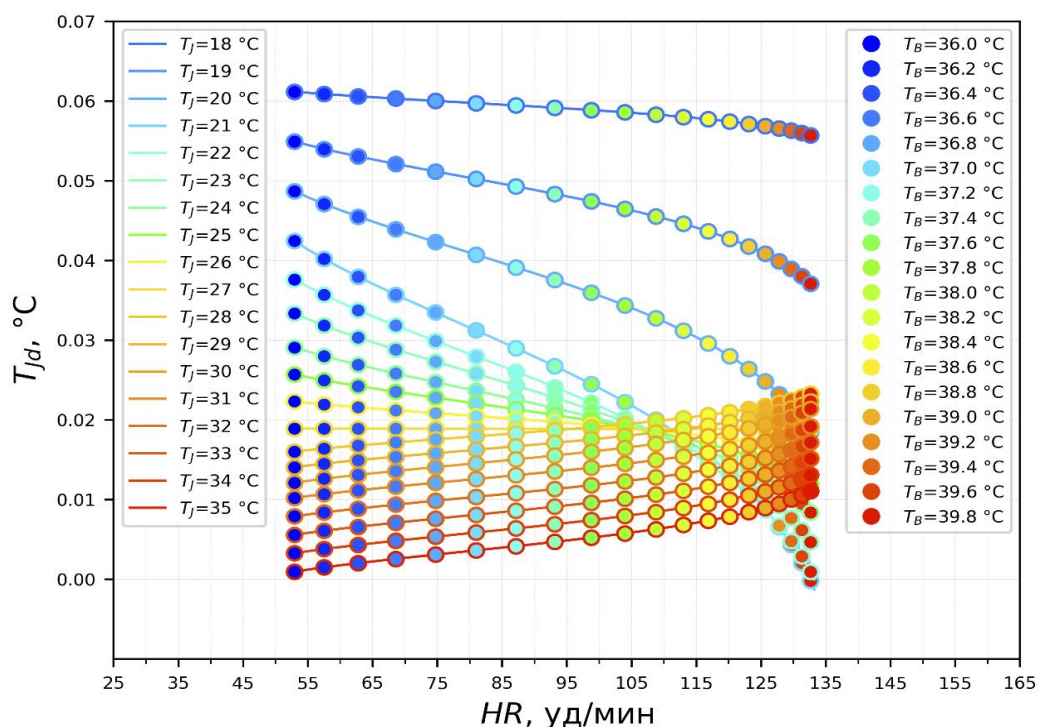


Рис. 4. Фрагмент комбинаций, синтезированных данных для обучения алгоритма регрессионной модели

Fig. 4. Fragment of synthesized data combinations used for training the regression model algorithm

На рисунке 4 видно, что синтезированные данные отражают особенности зависимости величины T_{Jd} от величины разницы между температурой ладони (зависит от ЦТТ) и температурой металлической пластины датчика. Также видно, что синтезированный набор данных отражает связь увеличения HR с увеличением T_B .

Выбор алгоритма машинного обучения для регрессионной модели

В качестве алгоритма регрессионной модели используется современная

модификация метода машинного обучения «случайный лес» [15] под названием «градиентный бустинг» [16; 17]. Основная идея метода заключается в использовании большого ансамбля решающих деревьев (разбиение, или bootstrap), каждое из которых само по себе дает невысокое качество результата, но за счет их усреднения (aggregation) итоговый результат обладает высокой точностью.

Основная особенность модификации метода «случайный лес» под названием «градиентный бустинг» заключается в том, что цель каждого следующего

слабого алгоритма – учиться на ошибках предыдущего. Таким образом, создается последовательность деревьев, которые соответствуют набору данных [16; 17].

В процессе обучения алгоритма на синтезированных данных были выявлены

оптимальные параметры для обучения: количество бинарных деревьев 100; минимальное количество признаков 1 при максимальном количестве признаков 3; скорость обучения 0,1. Рассмотрим схему обучения алгоритма (рис. 5).

$$D = (a_{ij}), i = 241542, j = 3$$

$$a_{i1}: T_{Jn+1} = T_{Jn} + d (^{\circ}\text{C}), n \in [18; 35], d = 0,1$$

$$a_{i2}: T_{Jd} (^{\circ}\text{C}) \in [-0,02; 0,06]$$

$$a_{i3}: HR (\text{уд/мин}) \in [41; 140]$$

Скорость обучения = 0,1

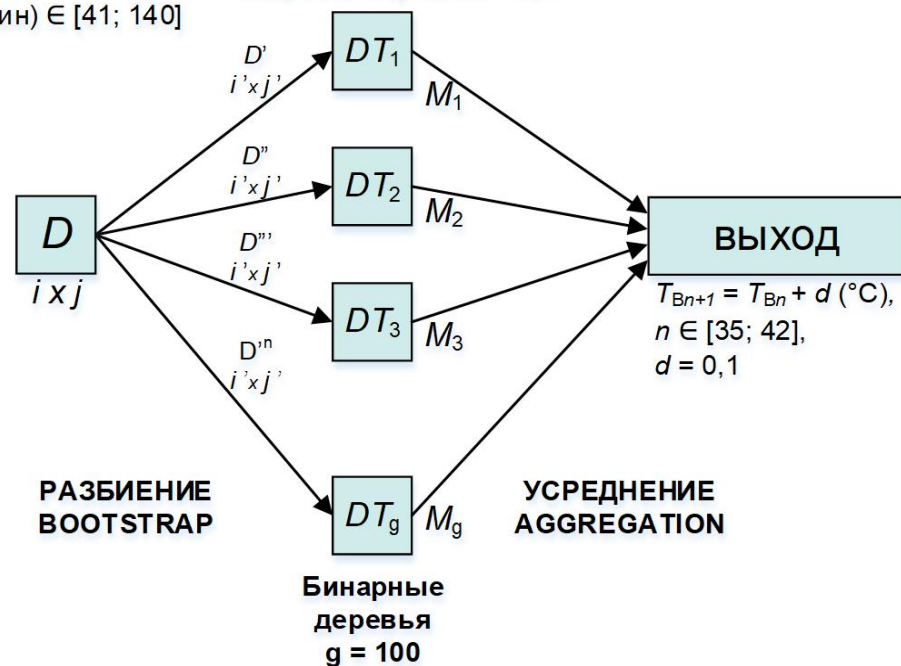


Рис. 5. Схема обучения алгоритма регрессионной модели

Fig. 5. Regression model algorithm training scheme

Результаты и их обсуждение

Валидация алгоритма оценки ЦТТ на основе измерения температуры ладоней и ЧСС во время прохождения теста СЗМР

Последовательность работы алгоритма (рис. 6):

- 1) предварительная обработка данных (табл. 1);
- 2) формирование строки данных за 1 с: T_J , T_{Jd} , HR ;

3) пересчет строки данных за 1 с в T_B с помощью обученного алгоритма регрессионной модели;

4) расчет медианы по всем однокундным точкам пересчета T_B , отдельно для левого и правого джойстика (рис. 6, з);

5) формирование результата измерения T_B как наибольшего значения между двумя медианами пересчета для левого и правого джойстиков (рис. 6, з).

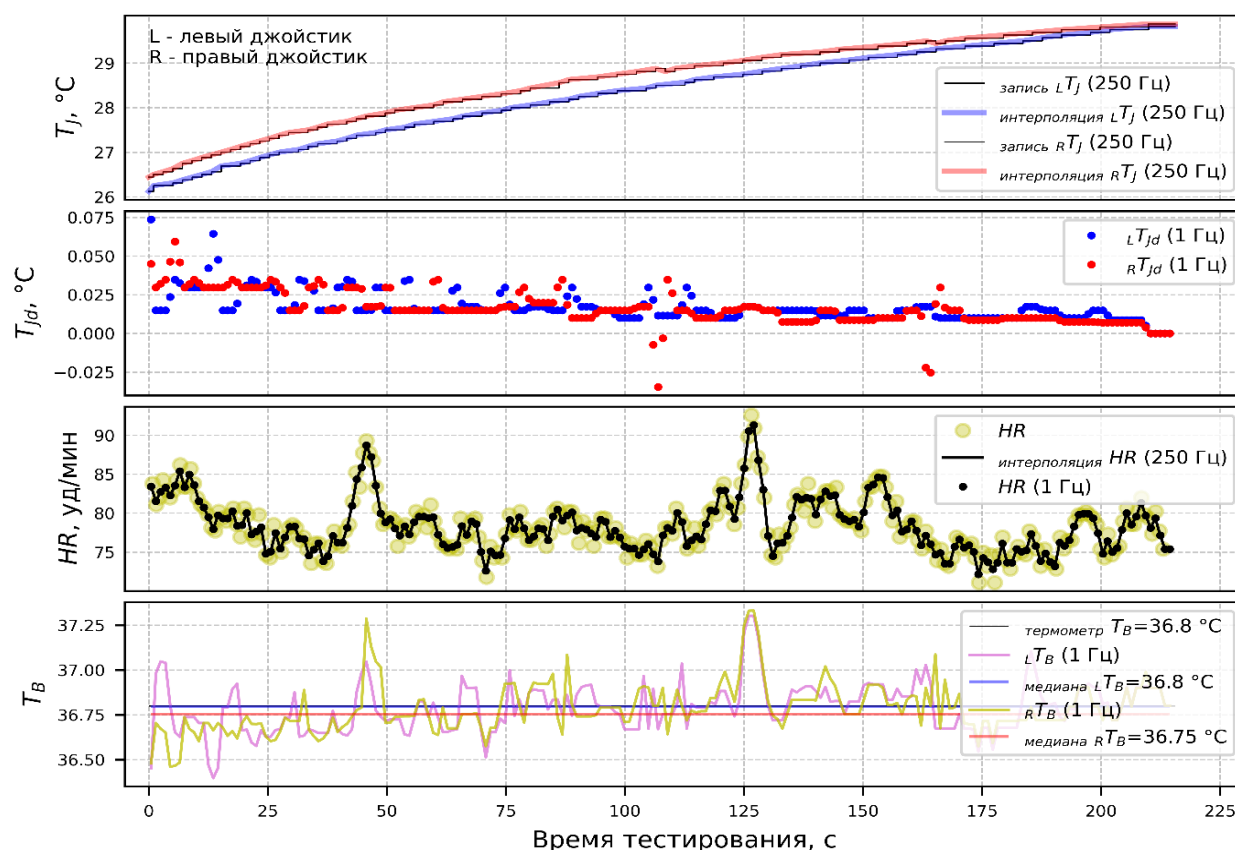


Рис. 6. Иллюстрация последовательности работы алгоритма оценки ЦТТ на примере одного измерения

Fig. 6. Illustration of the CBT assessment algorithm workflow using an example measurement

На рисунке 6 видно, что четвертым параметром при оценки T_B вместе с T_J , T_{Jd} , HR является время измерения, которое соответствует времени прохождения теста СЗМР и может составлять от 3,5 до 5 мин, в зависимости от скорости прохождения теста обследуемым. За время тестирования значение медианы односекундных отрезков пересчета параметров температуры ладони и ЧСС в ЦТТ максимально приближается к реальной ЦТТ обследуемого.

Сравнения алгоритмов оценки ЦТТ

Данные всех измерений, проведенных в рамках разработки методики, были

пересчитаны в ЦТТ. Данные ЧСС при прохождении теста СЗМР на КТС были пересчитаны в ЦТТ с помощью двух оригинальных модификаций алгоритма ЕС-Temp с линейной (linear) и логистической (logistic) зависимостью ЧСС от ЦТТ. Также оценка ЦТТ осуществлялась с использованием разработанного алгоритма в трех модификациях: 1) только на основе данных ЧСС; 2) только на основе данных температуры ладоней на джойстиках; 3) на основе данных температуры ладоней на джойстиках и ЧСС.

После пересчета ЦТТ сравнивалась с температурой подмышечной впадины, измеренной с помощью медицинского

термометра. Средняя абсолютная погрешность 5 алгоритмов оценки ЦТТ по

всем проведенным измерениям представлена ниже (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение средней абсолютной погрешности алгоритмов оценки ЦТТ

Table 2. Comparison of the average absolute error of CTT estimation algorithms

Показатель	ECTemp (linear)	ECTemp (logistic)	Алгоритм	Алгоритм	Алгоритм
Входные данные	ЧСС	ЧСС	ЧСС	t ладоней на джойстиках	t ладоней на джойстиках + ЧСС
Абсолютная погрешность	$\pm 0,4$ °C	$\pm 0,6$ °C	$\pm 0,4$ °C	$\pm 1,1$ °C	$\pm 0,3$ °C

В таблице 2 видно, что самое низкое значение средней абсолютной погрешности у разработанного алгоритма при использовании для пересчета данных как ЧСС, так и температуры ладоней. Этот результат подтверждает эффективность разработанной регрессионной модели на основе синтезированных данных. Высокое значение ($\pm 0,6$ °C) средней абсолютной погрешности оригинального алгоритма ECTemp (logistic) связано с тем, что пересчет в ЦТТ с его помощью проводился без корректировки коэффициентов логистической функции. Оригинальная логистическая функция алгоритма ECTemp (logistic) отражает зависимость ЧСС от ЦТТ, измеренной в условиях, отличных от условий проводимых измерений в рамках разработки текущей методики.

При анализе результатов измерений проведенных исследований было установлено, что значения температуры, полученные с помощью медицинского термометра, могут не соответствовать ЦТТ

в момент измерения на КТС по нескольким причинам:

1) между контрольным измерением и измерением на КТС проходит время – около 15 мин, за это время температура подмышечной впадины может измениться, так как ЦТТ человека подвержена изменениям, в том числе за небольшие промежутки времени (от нескольких десятков секунд), например, в силу эмоциональных реакций, возникших во время прохождения тестирования на КТС;

2) сложно контролировать точность измерения температуры обследуемыми в подмышечной впадине в некоторых случаях (при небольших значениях температуры до 36,0°C). Она может быть измерена не до конца, это может происходить в силу разных причин (например, градусник неплотно прилегает к подмышечной впадине).

После экспертной оценки на основе анализа ЧСС такие измерения были убраны из набора данных. После чего

среднее значение абсолютной погрешности разработанного алгоритма составило $\pm 0,18^{\circ}\text{C}$.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что для повышения точности процедуры верификации разработанного алгоритма оценки ЦТТ на новых устройствах проведения предсменного медицинского осмотра необходимо разработать процедуру одновременной регистрации ЦТТ, ЧСС и температуры ладоней. Процедура одновременно регистрации должна основываться на разработке новых программных и технических средств метрологической поверки.

Проверка разработанного алгоритма оценки ЦТТ на соответствие заявленным требованиям

Результаты оценки ЦТТ с помощью разработанного алгоритма пересчета на основе данных измерения температуры с ладоней и ЧСС сравнивались с температурой подмышечной впадины, измеренной с помощью медицинского термометра.

Результаты сравнения усреднялись отдельно для разных диапазонов: температуры на датчиках джойстиков в начале измерения (косвенно отражает температуру окружающей среды) и ЦТТ. Рассмотрим результаты сравнения (рис. 7).

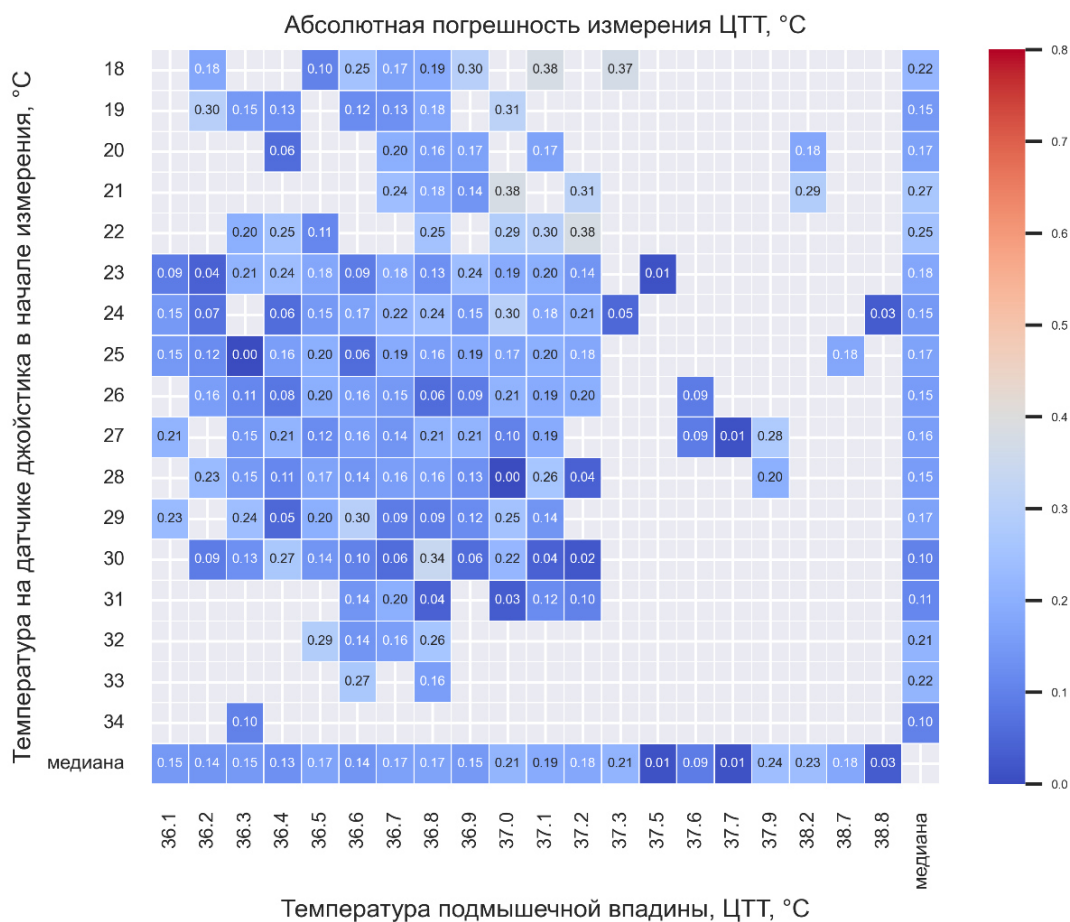


Рис. 7. Результаты валидации алгоритма

Fig. 7. Algorithm validation results

Заявленная абсолютная погрешность применения алгоритма считается достигнутой, если на всем диапазоне измерений удовлетворяет неравенству уравнения (3):

$$|T_k - T_a| \leq \Delta T_{\text{доп.к}} + \Delta T_{\text{доп.а}}, \quad (3)$$

$$|T_k - T_a| \leq 0,2, \quad (4)$$

где T_k – температура, измеренная контрольным термометром, °C; T_a – температура, измеренная с помощью алгоритма, °C; $\Delta T_{\text{доп.к}}$ – допустимая погрешность контрольного термометра 0,1°C; $\Delta T_{\text{доп.а}}$ – установленная погрешность алгоритма 0,1°C.

На рисунке 7 после округления значений абсолютной погрешности оценки ЦТТ до десятых результаты работы алгоритма на всем диапазоне измерений удовлетворяют неравенству (3), кроме 25% клеток, значения в которых незначительно выше 0,2°C, что связано с неодновременным, а последовательным измерением ЦТТ с помощью медицинского термометра и алгоритма оценки.

Работу алгоритма оценки ЦТТ на основе измерений и пересчета температуры ладоней и ЧСС во время прохождения теста СЗМР следует признать удовлетворяющей заявленным требованиям.

Выводы

Разработанный алгоритм оценки ЦТТ на основе измерений и пересчета

температуры ладоней и ЧСС во время прохождения теста СЗМР соответствует требованиям, предъявляемым к измерению температуры тела при проведении медицинских осмотров.

На основе разработанного алгоритма реализована методика косвенных измерений (МИ) «Методика измерений и пересчета температуры, полученной от ладоней, в температуру подмышечной впадины». Методика аттестована и зарегистрирована Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). МИ № 7780 внесена в реестр Росстандарта «Аттестованные методики (методы) измерений» под № ФР.1.32.2024.47935, номер свидетельства об аттестации 2207/2411-(RA.RU.310494)-2023 от 27.12.2023 г.

С использованием методики разработано специальное программное обеспечение (СПО) «Оценка функционального состояния». СПО зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) и внесено в реестр программ для ЭВМ. Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ – 2024612210 от 29.01.2024 г. Разработанное в соответствии с методикой СПО используется в программно-аппаратном комплексе, предназначенном для проведения предсменных медицинских осмотров.

Список литературы

1. Sund-Levander M., Forsberg C., Wahren L. K. Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review // *Scandinavian Journal of Caring Sciences*. 2002. N 16(2). P. 122–128. <https://doi.org/10.1046/j.1471-6712.2002.00069.x>
2. Физиология человека. Атлас динамических систем / К. В. Судаков, В. В. Андрианов, Ю. Е. Вагин, И. И. Киселев; под редакцией академика РАМН К. В. Судакова. 2-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2018. 416 с.
3. Kuht J., Farmery A. D. Body temperature and its regulation // *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. 2021. N 22(10). P. 657–662. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2021.07.004>
4. FeverPhone: Accessible Core-Body Temperature Sensing for Fever Monitoring Using Commodity Smartphones / J. Breda, M. Springston, A. Mariakakis, S. Patel // *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2023. N 7(1). P. 1–23. <https://doi.org/10.1145/3580850>
5. Lenhardt R., Sessler D. Estimation of Mean-body Temperature From Mean-skin and Core Temperature // *Anesthesiology*. 2007. N 105(6). P. 1117–1121. <https://doi.org/10.1097/00005542-200612000-00011>
6. Ураков А. Л., Касаткин А. А., Уракова Н. А. Инфракрасная термография пальцев и ладоней при шоке как способ оценки устойчивости пациентов к гипоксии и «отзывчивости» их к оживлению // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2013. № 4(44). С. 169–171. EDN RPTIQT
7. Взаимосвязь колебаний температуры и кровотока пальцев рук / Д. А. Усанов, А. А. Сагайдачный, А. В. Скрипаль, А. В. Фомин // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2012. № 2(42). С. 37–42. EDN PACULL
8. Skin and core temperature response to partial- and whole- body heating and cooling / C. Huizenga, H. Zhang, E. Arens, D. Wang // *Journal of Thermal Biology*. 2004. N 29(7-8). P. 549–558. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2004.08.024>
9. Michael K., Garcia-Souto M. D. P., Dabnichki P. An investigation of the suitability of Artificial Neural Networks for the prediction of core and local skin temperatures when trained with a large and gender-balanced database // *Applied Soft Computing*. 2017. N 50. P. 327–343. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.11.006>
10. Estimation of core body temperature from skin temperature, heat flux, and heart rate using a Kalman filter / A. P. Welles, X. Xu, W. R. Santee, D. P. Looney, M. J. Buller, A. W. Potter, R. W. Hoyt // *Computers in Biology and Medicine*. 2018. N 99(2). P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2018.05.021>
11. Prediction of Core Body Temperature Based on Skin Temperature, Heat Flux, and Heart Rate Under Different Exercise and Clothing Conditions in the Heat in Young Adult Males /

P. Eggenberger, B. A. MacRae, S. Kemp, M. Bürgisser, R. M. Rossi, S. Annaheim // *Frontiers in Physiology*. 2018. N 9(1780). P. 1–11. <http://doi.org/10.3389/fphys.2018.01780>

12. Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations / M. J. Buller, W. J. Tharion, S. N. Cheuvront, S. J. Montain, R. W. Kenefick, J. Castellani, W. A. Latzka, W. S. Roberts, M. Richter, O. C. Jenkins, R. W. Hoyt // *Physiological Measurement*. 2013. N 34(7). P. 781–798. <http://doi.org/10.1088/0967-3334/34/7/781>

13. Estimating Resting Core Temperature Using Heart Rate / D. P. Looney, M. J. Buller, A. V. Gribok, J. L. Leger, A. W. Potter, W. V. Rumlper, W. J. Tharion, A. P. Welles, K. E. Friedl, R. W. Hoyt // *Journal for the Measurement of Physical Behaviour*. 2018. N 1(2). P. 1–7. <http://doi.org/10.1123/jmpb.2017-0003>

14. Сепрано Л. Г. Грокаем машинное обучение. СПб.: Питер; 2024. 512 с.

15. Breiman L. Random Forests // *Machine Learning*. 2001. N 45(1). P. 5–32. <http://doi.org/10.1023/A:1010950718922>

16. Friedman J. H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine // *The Annals of Statistics*. 2001. N 29(5). P. 1189–1232. <http://doi.org/10.1214/aos/1013203451>

17. Boosting Algorithms as Gradient Descent in Function Space / L. Mason, J. Baxter, P. Bartlett, M. Frean. URL: https://www.researchgate.net/publication/2750572_Boosting_Algorithms_as_Gradient_Descent_in_Function_Space (дата обращения: 19.03.2025).

Reference

1. Sund-Levander M., Forsberg C., Wahren L.K. Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review. *Scandinavian Journal of Caring Sciences*. 2002;16(2):122–128. <https://doi.org/10.1046/j.1471-6712.2002.00069.x>

2. Sudakov K.V., Andrianov V.V., Vagin Yu.E., Kiselev I.I. Human physiology. Atlas of dynamic systems. 2nd ed. Moscow: GEOTAR-Media; 2018. 416 p. (In Russ.)

3. Kuht J., Farmery A.D. Body temperature and its regulation. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. 2021;22(10):657–662. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2021.07.004>

4. Breda J., Springston M., Mariakakis A., Patel S. FeverPhone: Accessible Core-Body Temperature Sensing for Fever Monitoring Using Commodity Smartphones. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2023;(7):1–23. <https://doi.org/10.1145/3580850>

5. Lenhardt R., Sessler D. Estimation of Mean-body Temperature From Mean-skin and Core Temperature. *Anesthesiology*. 2007;(105):1117–1121. <https://doi.org/10.1097/00000542-200612000-00011>

6. Urakov A.L., Kasatkin A.A., Urakova N.A. Infrared thermography of fingers and palms during shock as a way to assess patients' resistance to hypoxia and "recall" of their survival.

Vestnik Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2013;(4):169–171. (In Russ.) EDN RPTIQT

7. Usanov D.A., Sagaidachnyi A.A., Skripal' A.V., Fomin A.V. Relationship between temperature fluctuations and blood flow in the fingers. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya = Regional blood circulation and microcirculation*. 2012;(2):37–42. (In Russ.) EDN PACULL

8. Huizenga C., Zhang H., Arens E., Wang D. Skin and core temperature response to partial- and whole- body heating and cooling. *Journal of Thermal Biology*. 2004; (29):549–558. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2004.08.024>

9. Michael K., Garcia-Souto M.D.P., Dabnichki P. An investigation of the suitability of Artificial Neural Networks for the prediction of core and local skin temperatures when trained with a large and gender-balanced database. *Applied Soft Computing*. 2017;(50):327–343. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.11.006>

10. Welles A.P., Xu X., Santee W.R., Looney D.P., Buller M.J., Potter A.W., Hoyt R.W. Estimation of core body temperature from skin temperature, heat flux, and heart rate using a Kalman filter. *Computers in Biology and Medicine*. 2018;(99):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2018.05.021>

11. Eggenberger P., MacRae B.A., Kemp S., Bürgisser M., Rossi R.M., Annaheim S. Prediction of Core Body Temperature Based on Skin Temperature, Heat Flux, and Heart Rate Under Different Exercise and Clothing Conditions in the Heat in Young Adult Males. *Frontiers in Physiology*. 2018;(9):1–11. <http://doi.org/10.3389/fphys.2018.01780>

12. Buller M.J., Tharion W.J., Cheuvront S.N., Montain S.J., Kenefick R.W., Castellani J., Latzka W.A., Roberts W.S., Richter M., Jenkins O.C., Hoyt R.W. Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations. *Physiological Measurement*. 2013;(34):781–798. <http://doi.org/10.1088/0967-3334/34/7/781>

13. Looney D.P., Buller M.J., Gribok A.V., Leger J.L., Potter A.W., Rumpler W.V., Tharion W.J., Welles A.P., Friedl K.E., Hoyt R.W. Estimating Resting Core Temperature Using Heart Rate. *Journal for the Measurement of Physical Behaviour*. 2018;(1):1–7. <http://doi.org/10.1123/jmpb.2017-0003>

14. Serrano L.G. Grokking Machine Learning. Saint Petersburg: Piter; 2024. 512 p. (In Russ.)

15. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001;(45):5–32. <http://doi.org/10.1023/A:1010950718922>

16. Friedman J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*. 2001;(29):1189–1232. <http://doi.org/10.1214/aos/1013203451>

17. Mason L., Baxter J., Bartlett P., Frean M. Boosting Algorithms as Gradient Descent in Function Space. Available at: https://www.researchgate.net/publication/2750572_Boosting_Algorithms_as_Gradient_Descent_in_Function_Space (accessed 19.03.2025).

Информация об авторах / Information about the Authors

Вячеслав Викторович Савченко, аспирант,
Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии имени Д. И. Менделеева,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: sav4enk0@mail.ru,
ORCID: 0009-0002-6130-2486

Vyacheslav V. Savchenko, Post-Graduate
Student, D.I. Mendeleev Institute for Metrology,
St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: sav4enk0@mail.ru,
ORCID: 0009-0002-6130-2486

Владимир Александрович Сясько,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры теоретической
и прикладной метрологии, Всероссийский
научно-исследовательский институт
метрологии имени Д. И. Менделеева,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: 9334343@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-8599-9698

Vladimir A. Syasko, Doctor of Sciences
(Engineering), Associate Professor, Professor
of the Department Theoretical and Applied
Metrology, D.I. Mendeleev Institute for Metrology,
St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: 9334343@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-8599-9698