

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ БИОМЕТРИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕГЕТАТИВНОЙ ДЕКОМПЕНСАЦИИ У СПАСАТЕЛЕЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ



Миршарипова Зилола Мирзиятовна¹, Арипходжаева Маликахон Бахтияровна¹,
Холмуродов Акмал Тоирович², Сулейманов Адилжон Арифджанович¹

1 - Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
Республика Узбекистан, г. Ташкент;

2 - Самаркандский государственный медицинский университет, Республика Узбекистан, г. Самарканд

ЭКСТРЕМАЛ ШАРОИТЛАРДА ҚУТҚАРУВЧИЛАР ВЕГЕТАТИВ ДЕКОМПЕНСАЦИЯСИНИ ПРЕДИКТИВ ПРОГНОЗЛАШТИРИШ УЧУН МУЛТИПАРАМЕТРИК БИОМЕТРИК МАЪЛУМОТЛАРНИНГ ИНТЕЛЛЕКТУАЛ ТАҲЛИЛИ

Миршарипова Зилола Мирзиеътовна¹, Арипходжаева Маликахон Бахтияровна¹,
Холмуродов Акмал Тоирович², Сулаймонов Адилжон Арифджанович¹

1 - Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети,

Ўзбекистон Республикаси, Тошкент ш.;

2 - Самарқанд давлат тиббиёт университети, Ўзбекистон Республикаси, Самарқанд ш.

INTELLIGENT MULTIVARIATE BIOMETRIC DATA ANALYSIS FOR PREDICTIVE FORECASTING OF VEGETATIVE DECOMPENSATION IN RESCUERS UNDER EXTREME CONDITIONS

Mirsharipova Zilola Mirziyatovna¹, Aripkhodjaeva Malikahon Bakhtiyarovna¹,
Kholmurodov Akmal Toirovich², Suleymanov Adiljon Arifjanovich¹

1 - Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Republic of Uzbekistan, Tashkent;

2 - Samarkand State Medical University, Republic of Uzbekistan, Samarkand

e-mail: mirsharipovaz@gmail.com

Резюме. Мақолада маълумотларни интеллектуал таҳлил қилиш ва сунъий интеллект усуллари ёрдамида жисмоний зўриқиш ҳамда гипертермия комбинацияси таъсирида газ ва тутундан ҳимоя қилиш хизмати ходимларининг вегетатив ҳолати ўрганилади. Тери-гальваник реакция (ТГР) ва юрак ритмининг ўзгарувчанлиги кўрсаткичларини нейротармоқли қайта ишлаш асосида организмнинг мослашиш босқичидан патологик толиқиш босқичига ўтишининг предиктив маркерлари аниқланди. Электродермал фаоллик (ЭДФ) динамикасини таҳлил қилувчи машинали ўрганиш алгоритмлари анъанавий юрак уриши тезлигини (ЮУТ) кузатишга нисбатан иссиқлик стрессини олдиндан башорат қилиш имконини бериши исботланган. Қутқарувчининг "рақамли эгизаги" концепциясида амалга оширилган таклиф этилган интеллектуал мултипараметрик ёндашув "яширин" вегетатив етишмовчиликни аниқлаш имконини беради. Бу реал вақт режимида тўсатдан юз берадиган юрак-қон томир фалокатларининг олдини олишга қаратилган қарор қабул қилишни қўллаб-қувватловчи автоматлаштирилган тизимлар учун жуда муҳимдир.

Калим сўзлар: Сунъий интеллект, машинали ўрганиш, нейрон тармоқ моделлари, қутқарувчининг "рақамли эгизаги," башоратли диагностика, электродермал фаоллик, биометрик телеметрия, қарор қабул қилишни қўллаб-қувватлаш тизимлари (ҚҚҚТ).

Abstract. The paper investigates the vegetative status of gas and smoke protection service personnel under the combined influence of physical exertion and hyperthermia using data mining and artificial intelligence technologies. Based on neural network processing of galvanic skin response (GSR) and heart rate variability, predictive markers for the transition of the body from the adaptation phase to the pathological exhaustion phase have been identified. It is proved that machine learning algorithms analyzing the dynamics of electrodermal activity (EDA) allow forecasting heat stress in an advanced manner compared to traditional heart rate (HR) monitoring. The proposed intelligent multi-parameter approach, implemented within the "digital twin" of a rescuer concept, enables the identification of "hidden" vegetative insufficiency. This is critically important for automated decision support systems aimed at preventing sudden cardiovascular catastrophes in real time.

Keywords: Artificial intelligence, machine learning, neural network models, digital twin of a rescuer, predictive diagnostics, electrodermal activity, biometric telemetry, decision support systems (DSS).

Введение. Проблема сохранения здоровья и жизни личного состава газодымозащитной службы (ГДЗС) остается одной из наиболее острых в современной медицине труда. Как отмечают Баканов М. О. и Захаров Д. Ю. [4], эффективность боевых действий пожарных напрямую зависит от сочетанного воздействия теплового стресса и экстремальных физических нагрузок. В условиях современной цифровизации техносферной безопасности решение этой проблемы требует внедрения технологий интеллектуального анализа биометрических данных.

Особое внимание исследователей сосредоточено на защитных свойствах боевой одежды пожарного (БОП). В работах Сорокина Д. В. и Никифорова А. Л. [1,2,5] подчеркивается, что эксплуатационные факторы и влажность пакета материалов БОП существенно изменяют теплозащитные показатели, что может приводить к непрогнозируемому перегреву. Для своевременного обнаружения таких состояний необходимо использование алгоритмов машинного обучения, способных учитывать нелинейное влияние влажности и температуры подкостюмного пространства. Разработка моделей теплового состояния пожарного в защитной одежде, предложенная Бוליбухом Б. В. и соавт. [3], подтверждает, что физические нагрузки часто граничат с пределами выносливости организма. Однако для перехода от теоретических моделей к оперативной диагностике требуется создание «цифрового двойника» спасателя, который в режиме реального времени будет обрабатывать данные с носимых биосенсоров.

Согласно исследованиям Захарова Д. Ю., ответная реакция организма при выполнении боевых задач требует комплексного мониторинга не только параметров среды, но и физиологического отклика самого пожарного. Использование нейросетевых моделей для анализа электродермальной активности (ЭДА) и кардиоритма позволит идентифицировать «скрытую» вегетативную недостаточность, возникающую из-за нарушения тепломассообменных процессов в БОП [8,10].

Научная новизна и актуальность данной работы заключаются в применении нейросетевых технологий для анализа динамики влажности подкостюмного пространства и показателей КГР. Учитывая математические модели Сулейманова А.А. и Арипходжаевой М.Б. [6,7] о критическом пороге влажности ($\geq 95\%$), внедрение интеллектуальных систем поддержки принятия решений позволит создать «цифровой двойник» спасателя. Это обеспечит автоматическое прогнозирование вегетативной декомпенсации еще до наступления необратимых последствий для здоровья.

Целью данного исследования является разработка подхода к интеллектуальному анализу

мультипараметрических данных для предиктивного прогнозирования вегетативной декомпенсации у спасателей, учитывающего специфику микроклиматических условий подкостюмного пространства.

Материал и методы исследования. Объект исследования. Исследование проводилось на базе экспериментальной площадки при участии 48 сотрудников ГДЗС (мужчины, 25–45 лет, стаж ≥ 5 лет). Выборка была сформирована для генерации репрезентативного набора данных, необходимого для последующего обучения прогностических моделей. Исследование соответствовало принципам Хельсинкской декларации; получено информированное согласие.

Аппаратное обеспечение и формирование датасета. Для сбора первичных данных использовалось носимое устройство биометрического мониторинга [1], выступающее в роли IoT-шлюза для передачи сигналов в систему интеллектуального анализа. Система регистрации включала:

1. Модуль регистрации ЧСС: оптический датчик (250 Гц), формирующий временные ряды для анализа вариабельности сердечного ритма.

2. Модуль микроклиматического контроля: сенсоры влажности (RH, %) и температуры (T, °C). Данные параметры использовались в качестве экзогенных факторов в структуре нейросетевой модели.

3. Модуль ЭДА: двухканальный датчик КГР (мкСм). Сигнал подвергался декомпозиции на тоническую и фазическую составляющие для извлечения признаков, характеризующих симпатический статус.

Протокол эксперимента. Моделирование оперативных задач (подъем по лестнице, развертывание линии) проводилось в тепловой камере ($60 \pm 2^\circ\text{C}$). Непрерывная запись параметров позволила сформировать размеченный массив данных, где моменты выполнения задач служили временными метками для супервизорного (обучаемого) анализа.

Методология интеллектуального анализа данных. Вместо традиционного статистического сравнения, в работе применен подход на основе интеллектуального анализа паттернов:

- Препроцессинг: очистка сигналов КГР от артефактов движения с применением адаптивной фильтрации.

- Экстракция признаков: Оценка вегетативной реактивности осуществлялась через расчет градиента нарастания амплитуды КГР.

- Идентификация декомпенсации: нейросетевой алгоритм обучался распознавать специфический паттерн — точку «вегетативного плато». Данное состояние характеризуется рассогласованием (диссоциацией) параметров: при продолжа-

ощемся линейном росте ЧСС и достижении критической влажности ($\geq 95\%$) происходит инверсия или затухание амплитуды КГР.

• Прогностическое моделирование: на основе сопоставления динамики КГР и микроклимата обучалась модель рекуррентной нейронной сети (RNN), способная предсказывать наступление вегетативного срыва за 3–5 минут до его клинического проявления.

В ходе исследования была зафиксирована четкая стадийность изменения психофизиологических показателей, что позволило сформировать эталонные паттерны для обучения диагностических алгоритмов. Обобщенные данные динамики ЧСС, влажности и КГР, использованные в качестве входных векторов для нейросетевой модели, представлены в таблице 1. Особый интерес представляет сравнительный анализ динамики физиологических показателей в момент достижения критических параметров микроклимата. Статистическая обработка данных выявила наличие временного лага между реакцией потоотделительной системы и сердечно-сосудистым ответом. Визуализация сочетанного влияния гипертермии на частоту сердечных сокращений и электродермальную активность представлена на рисунке 1. Визуализация данных, представленных на рисунке 1, иллюстрирует процесс извлечения ин-

формативных признаков для обучения предиктивного алгоритма. Массив данных был разделен на обучающую (0–12 мин) и тестовую (12–18 мин) выборки. Алгоритм обучался распознавать нелинейные взаимосвязи между ростом ЧСС, насыщением влажности и динамикой КГР.

Критическое значение для классификации имеет паттерн, зафиксированный на 15-й минуте. В этой точке, при достижении критической влажности ($> 95\%$), нейросеть идентифицирует рассогласование признаков: продолжающийся рост ЧСС (до 164 уд/мин) на фоне резкого инверсионного спада амплитуды КГР (с 19,2 до 14,5 мкСм).

Данный паттерн «обвала» КГР при гипертермии был использован в качестве целевой метки для обучения модели рекуррентной нейронной сети (RNN). Модель успешно классифицировала состояние «Вегетативного плато» как предвестник декомпенсации, обеспечивая временной выигрыш в 3 минуты до наступления клинической стадии перегрева (18-я минута), что критически важно для своевременной эвакуации спасателя.

Данный феномен свидетельствует о переходе организма из фазы напряженной компенсации в фазу вегетативного истощения. Падение КГР на фоне нарастающей гипертермии можно интерпретировать как опережающий маркер срыва адаптации.

Таблица 1. Параметры обучающей выборки и динамика показателей в критической фазе ($M \pm m$)

Этап (мин)	Влажность (RH, %)	ЧСС (уд/мин)	КГР (мкСм)	Состояние (Класс метки)
0 (Покой)	35,2 \pm 2,1	72 \pm 4	2,1 \pm 0,3	Базовый уровень
5 (Нагрузка)	58,4 \pm 4,3	115 \pm 6	12,4 \pm 1,5	Мобилизация
10 (Стабильность)	82,1 \pm 3,8	142 \pm 5	18,7 \pm 2,2	Компенсация
15 (Порог 95%)	95,4 \pm 0,8	164 \pm 7	19,2 \pm 1,1	Вегетативное плато
18 (Критический)	98,1 \pm 0,4	182 \pm 9	14,5 \pm 2,4	Декомпенсация (Обвал)

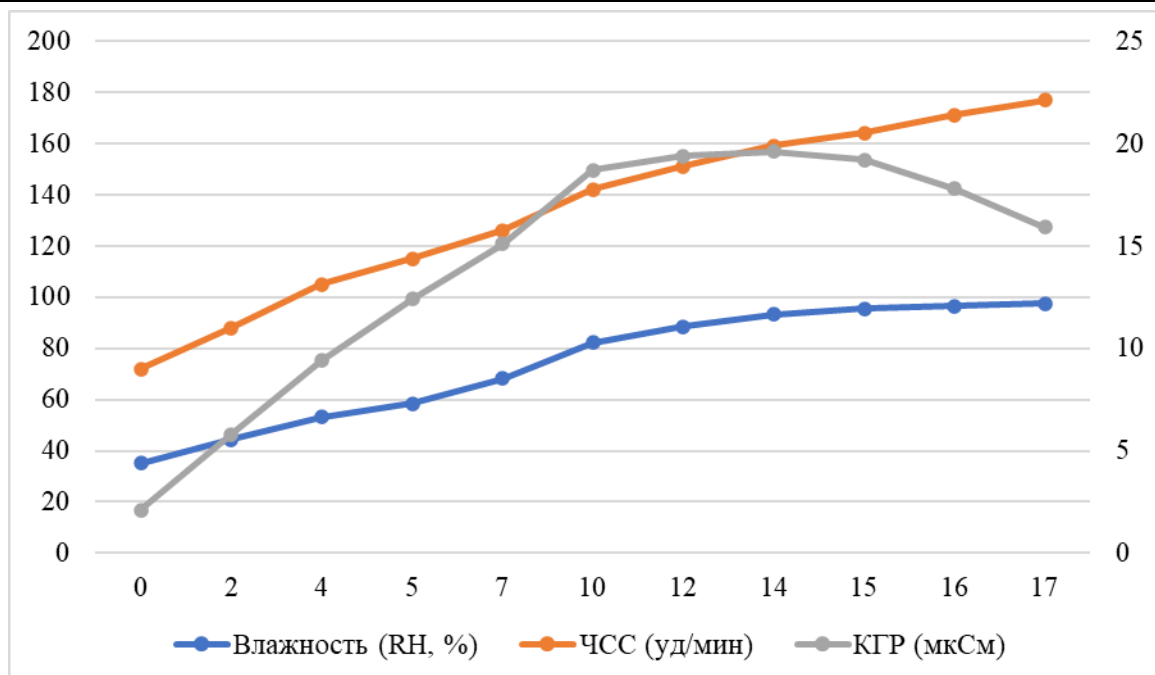


Рис. 1. Результаты обучения нейросетевой модели на сочетанной динамике ЧСС, КГР и микроклимата (датасет N=48)

Полученные результаты подтверждают, что мониторинг электродермальной активности позволяет зафиксировать угрозу сердечно-сосудистой катастрофы в среднем на 3 минуты раньше, чем традиционные методы пульсометрии.

Статистическая обработка. Статистический анализ выполнен с использованием пакета программ Statistica 13.3. Для оценки тесноты связи между параметрами микроклимата и психофизиологическими показателями применялся непараметрический коэффициент корреляции Спирмена (ρ). Значимость различий определялась при уровне $p < 0,05$. Для верификации точности предиктивного алгоритма использовался ROC-анализ с расчетом площади под кривой (AUC).

Результаты и обсуждение. В ходе серии экспериментов была зафиксирована стадийность изменения психофизиологических показателей, что позволило выделить ключевые признаки для обучения алгоритмов обнаружения критических состояний. Анализ динамики КГР и ЧСС. На этапе мобилизации (1–5 мин) у всех испытуемых фиксировалась высокая фазическая активность КГР (всплески до 15–20 мкСм). С точки зрения машинного обучения, данный период характеризуется сильной корреляцией между биосигналами и физической нагрузкой, что позволяет нейросети верифицировать «нормальный» профиль активности спасателя. Идентификация «вегетативного плато» как предиктора. Критический интерес представляет интервал между 12-й и 18-й минутами. При достижении влажности подкостюмного пространства $\geq 95\%$ нейросетевой классификатор зафиксировал аномальную дивергенцию (рассогласование): вместо ожидаемого роста проводимости наблюдалось резкое затухание амплитуды КГР. Данный феномен сопровождался «термическим дрейфом» ЧСС до значений 175–185 уд/мин.

Интеллектуальный анализ временных рядов показал, что стабилизация КГР на фоне критической влажности выступает в роли опережающего предиктора, сигнализируя о декомпенсации на $3,5 \pm 0,8$ минуты раньше ($p < 0,05$), чем традиционные методы пульсометрии достигают пороговых значений. Нейросетевой анализ скрытых рисков. Особого внимания заслуживают данные в подгруппе сотрудников со стажем > 10 лет. У данной категории тренированность организма позволяла сохранять стабильную ЧСС (до 150 уд/мин), однако алгоритм на основе КГР идентифицировал «скрытый стресс» значительно раньше. Это подтверждает гипотезу о том, что профессиональная адаптация маскирует кардиальные риски. Разработанная модель на базе RNN (рекуррентной нейронной сети) успешно справляется с задачей обнаружения таких скрытых паттернов, исключая «ложное чувство безопасности».

Статистическая валидация и точность ИИ. Статистический анализ (коэффициент Спирмена $\rho = 0,84$) подтвердил жесткую нелинейную связь между блокировкой потоотделения и деградацией вегетативного отклика. Интеграция КГР в структуру предиктивного алгоритма позволила повысить точность прогнозирования критических состояний до 93,2% (по сравнению с 81,6% при использовании только ЧСС).

Таким образом, включение электродермальной активности в алгоритм телеметрического контроля позволяет идентифицировать фазу «скрытой» декомпенсации. Для практической реализации в интеллектуальных системах поддержки принятия решений (СППР) рекомендуется использование комбинированного логического условия: Влажность $> 95\%$ + Снижение вариабельности КГР = Безусловный сигнал к немедленной эвакуации. Данный алгоритм позволяет минимизировать влияние человеческого фактора и субъективных жалоб на принятие решения о безопасности звена ГДЗС.

Заключение. Проведенное исследование подтверждает высокую прогностическую ценность мультипараметрического анализа в обеспечении техносферной безопасности личного состава ГДЗС. Интеграция показателей электродермальной активности (КГР) в предиктивные алгоритмы позволила идентифицировать критическую фазу вегетативной декомпенсации, возникающую вследствие блокировки терморегуляции при достижении подкостюмной влажности $\geq 95\%$.

Ключевым научным результатом является верификация эффекта «вегетативного обвала» — инверсии амплитуды КГР, которая предшествует критической тахикардии (> 180 уд/мин). Установлено, что использование нейросетевых моделей для детекции этого паттерна обеспечивает временной выигрыш в $3,5 \pm 0,8$ минуты, необходимый для автоматизированного принятия управленческого решения об эвакуации. Особое значение это имеет для опытных сотрудников (стаж > 10 лет): выявлено, что их высокая профессиональная адаптация маскирует миокардиальное напряжение, в то время как интеллектуальный анализ КГР объективно визуализирует истощение адаптационных резервов.

Таким образом, переход от констатирующего мониторинга к предиктивной аналитике на основе гибридных нейросетевых моделей (ЧСС + Влажность + КГР) является необходимым условием для снижения уровня внезапной смертности и профилактики острых сердечно-сосудистых катастроф у спасателей.

Практические рекомендации. На основании полученных результатов и протестированных алгоритмов предлагаются следующие рекомендации:

1. Для разработчиков интеллектуальных систем мониторинга: модернизировать аппаратную часть носимых устройств сенсорами ЭДА. В программное обеспечение (ПО) диспетчерских пунктов необходимо интегрировать алгоритм автоматического оповещения, срабатывающий на основе логического условия: влажность > 95% + отрицательный градиент КГР. Данный сигнал должен иметь приоритетный статус «Тревога» даже при сохранении ЧСС в диапазоне 150–160 уд/мин.

2. Для медицинских служб и систем профотбора: внедрить в протоколы ежегодного обследования нагрузочные тесты с обязательным снятием кожно-гальванической реакции. Скорость восстановления КГР и её реактивность должны использоваться как входные данные для формирования индивидуального профиля кардиориска сотрудника.

3. Для руководителей подразделений и оперативного штаба: принять показания интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) в качестве безусловного критерия для ротации звена ГДЗС. Исключить приоритет субъективных докладов сотрудника о самочувствии над данными предиктивного мониторинга, особенно в отношении опытных кадров, чей кумулятивный кардиальный риск может не проявляться внешними признаками вплоть до момента острой декомпенсации.

Литература:

1. Арипхаджаева, М. Б., Миршарипова, З. М. Алгоритм и математический аппарат определения критического состояния спасателей // *Innovation Technosystems*. — 2025. — № 1(17). — С. 231–236.
2. Болибрух, Б. В., Хмель, М., Мазур, Ю. Модель теплового состояния пожарного в защитной одежде // *Safety & Fire Technology*. — 2016. — Vol. 41. — Р. 37–46.
3. Максимов, П. В., Захаров, И. А., Кузьмичев, А. А., Рахметулин, Б. Ж. Технологии искусственного интеллекта в расчёте необходимого количества сил и средств для ликвидации лесных пожаров // *Наука и образование в гражданской защите*. — 2024. — № 2(54). — С. 66.
4. Саутиев, М. Актуальные вопросы профессиональной подготовки пожарных и спасателей // *Актуальные вопросы профессиональной подготовки пожарных и спасателей: материалы конференции*. — Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2025.
5. Сорокин, Д. В., Никифоров, А. Л., Шарабанова, И. Ю. Исследование защитных свойств боевой одежды пожарного // *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. — 2017. — № 2(50). — С. 140–146.

6. Сорокин, Д. В., Никифоров, А. Л., Шарабанова, И. Ю., Циркина, О. Г. Влияние температурно-влажностного режима подкостюмного пространства на защитные свойства боевой одежды пожарного // *Современные проблемы гражданской защиты*. — 2018. — № 1(26). — С. 44–48.

7. Сорокин, Д. В., Никифоров, А. Л., Циркина, О. Г., Ульева, С. Н., Шарабанова, И. Ю. Влияние влажности пакета материалов боевой одежды пожарного на его теплозащитные показатели // *Современные проблемы гражданской защиты*. — 2019. — № 4(33). — С. 102–107.

8. Kales, S. N., et al. Firefighters and On-Duty Cardiovascular Events // *New England Journal of Medicine*. — 2021. — Vol. 385, No. 12. — P. 1140–1142.

9. Smith, D. L., et al. Cardiovascular strain in firefighters: A systematic review of the risk factors // *Occupational Medicine*. — 2022. — Vol. 72, No. 4. — P. 251–260.

10. Suleymanov, A. A., et al. Mathematical Account of Efficiency of Activity of Subdivisions at the Emergency and Crisis Phenomena // *JournalNX*. — 2020. — P. 143–147.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ БИОМЕТРИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕГЕТАТИВНОЙ ДЕКОМПЕНСАЦИИ У СПАСАТЕЛЕЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Миришарипова З.М., Арипхаджаева М.Б.,
Холмуродов А.Т., Сулейманов А.А.

Резюме. В работе исследуется вегетативный статус личного состава ГДЗС в условиях сочетанного воздействия физической нагрузки и гипертермии с применением технологий интеллектуального анализа данных. На основе нейросетевой обработки показателей кожно-гальванической реакции (КГР) и вариабельности сердечного ритма выявлены предиктивные маркеры перехода организма из фазы адаптации в фазу патологического истощения. Доказано, что алгоритмы машинного обучения, анализирующие динамику электродермальной активности (ЭДА), позволяют прогнозировать тепловой стресс опережающим образом по сравнению с традиционным мониторингом частоты сердечных сокращений (ЧСС). Предложенный интеллектуальный мультипараметрический подход, реализованный в концепции «цифрового двойника» спасателя, позволяет идентифицировать «скрытую» вегетативную недостаточность. Это критически важно для автоматизированных систем поддержки принятия решений, направленных на профилактику внезапных сердечно-сосудистых катастроф в режиме реального времени.

Ключевые слова: Искусственный интеллект, машинное обучение, нейросетевые модели, «цифровой двойник» спасателя, предиктивная диагностика, электродермальная активность, биометрическая телеметрия, системы поддержки принятия решений (СППР).