

УДК 339.54.012

Хлюпин Дмитрий Павлович, студент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Титов Владислав Андреевич, студент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Милушев Эдуард Ханифович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

СИСТЕМА ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ «УМНОГО» ПОМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА

В условиях стремительной цифровизации и распространения информационных решений в различные области, включая сферу безопасности и жизнеобеспечения, возрастает потребность в разработке интеллектуальных систем контроля параметров окружающей среды с акцентом на индивидуальные потребности пользователя. Данная работа направлена на изучение потенциала создания системы прогнозного регулирования микроклимата в интеллектуальной среде обитания, основанной на постоянном отслеживании физиологического состояния человека, в частности, кожной температуры. В исследовании анализируется связь между концепцией индивидуального теплового комфорта и общей тенденцией к персонализации в информационных системах, отвечающих за безопасность и жизнеобеспечение. Выполнен обзор зарубежных научных работ, посвящённых применению кожной температуры в качестве биомаркера для оценки теплового восприятия, а также рассмотрены перспективы использования алгоритмов машинного обучения для построения адаптивных прогностических моделей. Подчёркивается важность внедрения подобных индивидуализированных решений в действующие автоматизированные комплексы управления безопасностью и микроклиматом, что способно привести к повышению персонального комфорта и рациональному использованию энергоресурсов.

Annotation

In the context of rapid digitalization and the spread of information solutions in various fields, including security and life support, there is an increasing need to develop intelligent systems for monitoring environmental parameters, with a focus on individual user needs. This work aims to explore the potential of creating a predictive microclimate regulation system in an intelligent habitat based on continuous monitoring of human physiological conditions, particularly skin temperature. The study analyzes the relationship between the concept of individual thermal comfort and the overall trend towards personalization in information systems responsible for security and life support. The article provides an overview of foreign scientific papers on the use of skin temperature as a biomarker for assessing thermal perception, and discusses the prospects for using machine-learning algorithms to build adaptive predictive models.

Ключевые слова: прогнозное управление, интеллектуальная среда, индивидуальный тепловой комфорт, кожная температура, машинное обучение, информационные системы, безопасность жизнедеятельности

Keywords: predictive control, intelligent environment, individual thermal comfort, skin temperature, machine learning, information systems, life safety

Введение

Цифровая трансформация общества затрагивает все сферы, включая создание безопасной и комфортной среды обитания. Информационные технологии становятся ключевым инструментом для сбора, обработки данных и принятия решений в системах управления зданиями и обеспечения безопасности населения [5]. На фоне развития таких масштабных систем, как АИУС РСЧС (Автоматизированная информационно-управляющая система Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций), и распространения мобильных сервисов для информирования граждан, возникает новая перспективная ниша — создание персонализированных систем управления микроклиматом на основе

физиологических данных пользователя [7]. Данное направление лежит в русле глобального тренда на «гиперперсонализацию» услуг и среды обитания с помощью данных, генерируемых самим пользователем (quantified self). Если ранее системы безопасности и жизнеобеспечения были ориентированы на защиту и поддержание базовых функций больших групп людей в стандартизированных условиях, то сегодня акцент смещается на превентивное обеспечение индивидуального благополучия, что является логическим развитием парадигмы безопасности. Тепловой комфорт, будучи фундаментальным фактором физиологического и психологического состояния, непосредственно влияет на работоспособность, здоровье и, как следствие, на безопасность деятельности. Таким образом, предиктивное управление микроклиматом можно рассматривать как проактивную технологию БЖД нового поколения, действующую на превентивном, а не на реактивном уровне. Традиционные подходы к термальному комфорту, такие как модель PMV (Predicted Mean Vote), разработаны для усредненного человека и часто не соответствуют индивидуальным ощущениям, что приводит к дискомфорту и неэффективному использованию энергии [1, 2]. Актуальным направлением является переход к персонализированным моделям комфорта (Personal Comfort Models), которые с помощью машинного обучения прогнозируют предпочтения конкретного человека на основе данных с носимых датчиков [3, 4]. Такой подход, лежащий на стыке IT и БЖД, позволяет не только повысить качество жизни, но и создать проактивные («предиктивные») системы, предугадывающие потребности пользователя для поддержания оптимального состояния.1.

Физиологические показатели как основа для предиктивной системы: от кожи к когниции

Человеческое тело, следуя принципам терморегуляции, поддерживает постоянную внутреннюю температуру, регулируя температуру кожи в зависимости от окружающих условий. Это делает температуру кожи перспективным биоиндикатором для оценки теплового ощущения (thermal sensation) [1]. Исследование, проведенное Дж.-Х. Чой и В. Лофтнесс, показало,

что изменения температуры кожи (градиент) более согласованы с условиями теплового комфорта, чем ее абсолютные значения. Эксперименты с участием 26 человек в климатической камере выявили, что температура кожи на запястье (wrist) дает наиболее стабильные и интерпретируемые данные для представления общего теплового ощущения в термически однородной среде [1]. Более поздние масштабные исследования, такие как работа Шичао Лю и его коллег, подтвердили потенциал использования носимых датчиков для построения персональных моделей комфорта в реальных условиях. В ходе эксперимента 14 участников в течение 2–4 недель непрерывно носили датчики, отслеживающие температуру кожи (на запястье и лодыжке), сердечный ритм и активность. Машинное обучение на этих данных позволило построить индивидуальные модели для прогнозирования тепловых предпочтений («прохладнее», «без изменений», «теплее»). Медианная предсказательная способность лучших моделей достигла 24%/78%/0.79 (коэффициент Коэна/точность/AUC), что значительно превосходит традиционные модели PMV [2]. Важным выводом является то, что лодыжка (ankle) оказалась более предсказательной точкой для измерения температуры кожи, чем запястье, что связано с ее ролью как периферийной конечности, более чувствительной к изменениям терморегуляции [2]. При этом, персональные модели наиболее точны, когда ощущения пользователя находятся вне зоны термальной нейтральности (т.е., когда человеку явно прохладно или жарко), что идеально подходит для задачи предиктивной системы — предотвращать дискомфорт, опережающе корректируя микроклимат. Однако современные исследования идут дальше, связывая параметры теплового комфорта с когнитивными функциями и показателями цифрового здоровья. Новый пласт данных может включать не только температуру кожи, но и вариабельность сердечного ритма (HRV), как индикатор активности автономной нервной системы и уровня стресса, и данные электроэнцефалографии (ЭЭГ) с носимых нейрогарнитур для оценки уровня концентрации и умственной усталости. Дисбаланс термального комфорта вызывает стрессовую реакцию, которая отражается в снижении HRV и

изменении паттернов ЭЭГ. Таким образом, предиктивная система, получающая доступ к этому мультимодальному физиологическому потоку, может решать не только задачу термальной адаптации, но и выступать в роли инструмента нейроэргономики — оптимизировать среду для поддержания пиковой когнитивной производительности и психоэмоционального благополучия. Это превращает «умное» помещение из климатической оболочки в активного участника поддержки безопасной и эффективной деятельности человека, особенно в критических профессиях (диспетчеры, операторы, врачи), где цена ошибки из-за дискомфорта или усталости крайне высока. Данный аспект формирует прямую мостиковую связь между, казалось бы, бытовой задачей климат-контроля и высокоуровневыми задачами промышленной безопасности и надежности человеко-машинных систем.

Архитектура предиктивной системы управления микроклиматом

На основе анализа исследований можно предложить архитектуру системы для «умного» помещения. Первый слой — сбор данных (IoT-сенсоры): носимые устройства (датчики температуры кожи на лодыжке и запястье, сердечного ритма, акселерометр), датчики среды в помещении (температура, влажность, скорость воздуха) и внешние данные о погодных условиях. Второй слой — передача и агрегация данных через IoT-шлюз в облачный или локальный вычислительный модуль. Третий, ключевой слой — аналитика и машинное обучение (Предиктивный движок). Здесь происходит обработка сигналов: извлечение признаков из сырых данных (средние значения, градиенты скорости изменения за последние 5-60 минут, стандартные отклонения). На их основе работает персональная модель машинного обучения (например, Stochastic Gradient Boosting, Random Forest), обученная на исторических данных конкретного пользователя и прогнозирующая его тепловое предпочтение. Затем предиктивный контроллер на основе прогноза модели и текущих параметров среды вычисляет оптимальные управляющие воздействия для системы HVAC (отопление, вентиляция, кондиционирование) или персональных устройств. Четвертый слой — исполнение и обратная связь: исполнительные механизмы

(система HVAC, сервоприводы) и интерфейс пользователя (мобильное приложение для калибровки, просмотра данных и сбора субъективных оценок для дообучения модели).

Для реализации описанного выше расширенного функционала, связанного с когнитивным состоянием, требуется переход к более сложной, многоагентной архитектуре (Multi-Agent System, MAS). В такой системе действуют несколько интеллектуальных агентов: Агент термального профиля отвечает за мониторинг температуры кожи и прогноз комфорта. Агент психофизиологического состояния анализирует данные HRV, ЭЭГ (при наличии) и акселерометра для оценки уровня стресса, усталости и когнитивной нагрузки. Агент контекста анализирует календарь пользователя (периоды совещаний, интенсивной работы, отдыха), тип активности (сидячая, стоячая, двигательная) и даже характер работы с клавиатурой и мышью для косвенной оценки вовлеченности. Координирующий агент (арбитр) на основе рекомендаций от профильных агентов, с учетом приоритетов (например, в период важной задачи приоритет — поддержание когнитивной производительности, даже если термальный комфорт слегка отклоняется от идеала) формирует итоговое управляющее воздействие для систем помещения.

Центральным элементом такой системы становится персональный «цифровой двойник» теплового и психофизиологического комфорта пользователя. Это динамическая вычислительная модель, которая эмулирует реакции конкретного человека на различные сочетания параметров микроклимата, его активности и контекста. Двойник постоянно обучается на новых данных, позволяя системе не только реагировать, но и проводить виртуальные эксперименты («что, если?») для выбора оптимальной превентивной стратегии. Например, зная по календарю, что через 15 минут у пользователя начинается видеоконференция, система может заранее скорректировать температуру в сторону слегка прохладной, что, согласно исследованиям, способствует повышению бдительности и концентрации внимания.

Технологические вызовы, ограничения и пути их преодоления

Несмотря на значительный потенциал, внедрение систем предиктивного управления микроклиматом на основе физиологических данных сопряжено с рядом технологических вызовов. Одной из ключевых проблем является качество и надёжность данных. Сигналы с носимых датчиков могут быть подвержены артефактам движения, электромагнитным помехам и временному отсоединению, что требует разработки сложных алгоритмов предобработки и валидации данных. Решение может лежать в использовании сенсорной фузии (sensor fusion) — интеллектуальном объединении данных с нескольких однотипных и разнотипных датчиков (например, несколько точек измерения температуры на теле) для получения робастной и достоверной оценки, устойчивой к помехам на отдельных каналах.

Другим существенным ограничением является необходимость длительного периода первоначального обучения персональной модели для каждого пользователя, что может занимать от нескольких дней до нескольких недель и создаёт неудобства на этапе внедрения. Для сокращения этого периода предлагается использовать методы трансферного обучения (transfer learning) и мета-обучения (meta-learning). Идея заключается в предварительном обучении базовой модели на больших анонимизированных наборах данных тысяч пользователей. Эта модель уже «понимает» общие паттерны связи физиологии и комфорта. При подключении нового пользователя модель быстро дообучается (fine-tuning) на его ограниченных начальных данных, достигая приемлемой точности за часы, а не недели [6].

Кроме того, можно применять активное обучение (active learning), когда система целенаправленно запрашивает у пользователя субъективную оценку комфорта в наиболее неопределённых, с точки зрения модели, условиях, максимизируя информативность каждого запроса и ускоряя процесс обучения. Кроме того, возникает вопрос масштабируемости — системы, эффективно работающие в условиях контролируемого эксперимента или для отдельных пользователей, могут столкнуться с проблемами при развёртывании в больших

офисных зданиях или многоквартирных домах с десятками и сотнями пользователей. Проблема заключается в вычислительной нагрузке, сложности управления конфликтующими предпочтениями (одному жарко, другому холодно в одном помещении) и сетевых задержках. Архитектурным решением здесь может быть применение распределённых вычислений на граничных устройствах (edge computing). Первичная обработка сырых данных и выполнение простых моделей происходит непосредственно на IoT-шлюзах или персональных устройствах пользователя. В облако или на центральный сервер передаются уже агрегированные признаки или результаты предсказаний, что снижает нагрузку на сеть и центр обработки. Для разрешения конфликтов в общих зонах могут использоваться алгоритмы оптимизации с учётом предпочтений большинства или ротации зон комфорта, а также применение персональных систем микроклимата (например, персональные вентиляторы или нагреватели, интегрированные в рабочее место).

Также важно учитывать вариабельность физиологических реакций одного и того же человека в зависимости от его состояния здоровья, уровня стресса, физической активности и циркадных ритмов, что требует от моделей высокой адаптивности и способности к непрерывному дообучению. Здесь на помощь приходят рекуррентные нейронные сети (RNN), в частности, архитектуры типа LSTM (Long Short-Term Memory), которые способны учитывать временные зависимости и контекст в последовательностях данных. Такая модель может «помнить», что у пользователя сегодня легкая простуда, и корректировать прогноз комфорта соответственно, или учитывать, что в вечернее время предпочтительная температура обычно выше, чем в утренние рабочие часы.

Связь с вопросами информационной безопасности и БЖД

Внедрение таких систем напрямую связано с ключевыми направлениями, затронутыми в статье по информационным технологиям в БЖД [5, 7]. Во-первых, это персонализация в противовес усреднению: так же, как АИУС РСЧС эволюционирует от единой системы к комплексу взаимосвязанных сервисов

(АПК «Безопасный город», «Атлас опасностей и рисков», мобильные приложения), управление комфортом движется от общих стандартов к индивидуальным моделям. Во-вторых, роль мобильных и носимых технологий: развитие мобильных приложений МЧС («Термические точки») для информирования о рисках демонстрирует тренд на использование смартфонов и датчиков для повышения безопасности. Система предиктивного микроклимата логично продолжает эту тенденцию, но на уровне личного, а не общественного пространства. В-третьих, актуальность информационной грамотности: работа с персональными физиологическими данными требует повышенного внимания к информационной безопасности и цифровой культуре. Пользователь должен понимать, какие данные собираются, как они защищаются и используются. Этот аспект прямо коррелирует с необходимостью введения в курс ОБЖ разделов по культуре информационной безопасности [5]. В-четвертых, проектирование человеко-машинных систем: разработка подобной системы является примером проектирования сложной информационной технологии для управления БЖД, требующей интеграции организационного, информационного, технического, программного и правового обеспечения. В свете расширения функционала системы до мониторинга психофизиологического состояния, вопросы безопасности и этики выходят на первый план. Сбор и обработка данных ЭЭГ, HRV и паттернов деятельности относятся к категории особо чувствительных биометрических и поведенческих данных. Их утечка или неправомерное использование может нанести значительный ущерб — от коммерческого шпионажа (определение момента максимальной усталости сотрудника конкурента) до психологического манипулирования. Поэтому обязательным элементом архитектуры должна стать сквозная криптография (end-to-end encryption) на всех этапах передачи данных. Не менее важным является обеспечение цифрового суверенитета пользователя — прозрачность в том, какие алгоритмы принимают решения, возможность легко экспортировать свои данные и модель («цифровой двойник»), а также право на «цифровую забывчивость» — полное удаление всех данных по требованию. Это порождает

новую предметную область на стыке БЖД и IT — безопасность и этику нейроинтерфейсов и биоинформационных систем, которую необходимо включать в программы подготовки специалистов по информационной безопасности и БЖД.

Перспективы интеграции с системами «умного города» и экосистемой цифрового здоровья

Развитие предиктивных систем микроклимата открывает широкие перспективы для их интеграции в более масштабные экосистемы «умного города» (Smart City). Подобные персонализированные системы могут стать важным элементом децентрализованной сети управления ресурсами, взаимодействуя с интеллектуальными сетями электроснабжения (Smart Grid) для оптимизации энергопотребления в часы пик и снижения общей нагрузки на энергосистему. Агрегированные анонимные данные о тепловых предпочтениях жителей целого района могут помочь энергетическим компаниям более точно прогнозировать нагрузку и управлять генерацией. На уровне городского планирования агрегированные и анонимизированные данные о тепловом комфорте населения могут использоваться для анализа микроклиматических зон в городе, проектирования более эффективных систем общественного транспорта и создания комфортных общественных пространств. Кроме того, в случае чрезвычайных ситуаций (например, волн жары или аномальных холодов) такая система, интегрированная с платформами оповещения, как АИУС РСЧС, сможет предоставлять персонализированные рекомендации по поведению и автоматически адаптировать условия в помещениях для уязвимых групп населения (пожилые люди, люди с хроническими заболеваниями), что напрямую способствует повышению безопасности жизнедеятельности в масштабах всего города.

Отдельное и крайне перспективное направление — интеграция с экосистемой цифрового здоровья (Digital Health) и телемедицины. Цифровой двойник комфорта, обогащенный данными о вариабельности сердечного ритма и активности, может стать ценным источником информации для системы

предикативной (предсказательной) медицины. Длительные отклонения в паттернах терморегуляции или фоновом уровне стресса могут служить ранними, пресимптоматическими маркерами развивающихся заболеваний. С согласия пользователя эти анонимизированные тренды могут направляться в его личный кабинет здоровья или, в критических случаях, с генерацией предупреждения — лечащему врачу. Таким образом, система управления микроклиматом трансформируется в круглосуточного неинвазивного монитора благополучия, работающего в фоновом режиме повседневной жизни, что является новой, проактивной формой обеспечения безопасности здоровья человека.

Заключение

Интеграция ИТ и БЖД выходит на новый уровень персонализации, где на первый план выходит благополучие и комфорт конкретного человека в его непосредственном окружении. Исследования подтверждают техническую осуществимость создания систем предиктивного управления микроклиматом на основе физиологических сигналов, в первую очередь температуры кожи. Машинное обучение позволяет строить эффективные персональные модели комфорта, которые значительно точнее традиционных подходов. Разработка и внедрение таких систем требуют междисциплинарного подхода, объединяющего знания в области строительной физики, физиологии, data science, IoT и информационной безопасности. Это направление не только повышает качество жизни, но и открывает путь к значительной энергоэффективности за счет точного, адресного и опережающего управления климатическим оборудованием. В перспективе подобные персонализированные «цифровые двойники» комфорта могут стать неотъемлемой частью экосистемы умного и безопасного города, работая в гармонии с системами более широкого масштаба.

Однако для успешной реализации этого потенциала необходимо преодолеть существующие технологические барьеры, обеспечить надёжную защиту персональных данных и разработать стандарты для совместимости таких систем с другими элементами цифровой инфраструктуры. Как показано в работе, дальнейшее развитие связано с переходом от простых термальных моделей к

комплексным системам поддержки психофизиологического состояния на основе многоагентных архитектур и цифровых двойников. Это требует углублённых исследований в области нейроэргономики, разработки новых алгоритмов машинного обучения для работы с мультимодальными временными рядами и создания надежных механизмов кибербезопасности для биометрических данных. Ключевым становится этический аспект — формирование правовых и нормативных рамок, обеспечивающих прозрачность, контроль и суверенитет пользователя над его цифровым отпечатком. Только при условии комплексного подхода, синтезирующего технические инновации, строгие стандарты безопасности и гуманистические этические принципы, предиктивное управление средой обитания сможет реализовать свой полный потенциал. Оно превратится из инструмента климат-контроля в фундаментальный компонент новой парадигмы безопасности жизнедеятельности, ориентированной на превентивное обеспечение индивидуального здоровья, благополучия и эффективности в цифровую эпоху, закладывая основы для truly human-centric умных пространств будущего.

Список литературы

1. Чой Дж.-Х., Лофтнесс В. Исследование температуры кожи человека как биосигнала, указывающего на общие тепловые ощущения // Строительство и окружающая среда. 2012. Том 58. С. 258-269.
2. Лю С., Скьявон С., Дас Х. П., Джин М., Спанос К. Дж. Модели персонального теплового комфорта с носимыми датчиками // Строительство и окружающая среда. 2019. Том 162. С. 106281.
3. Ким Дж., Скьявон С., Брагер Г. Модели персонального комфорта – новая парадигма теплового комфорта для экологического контроля, ориентированного на жильцов // Строительство и окружающая среда. 2018. Том 130. С. 96-106.

4. Даум Д., Халди Ф., Морель Н. Персонализированный показатель теплового комфорта для контроля зданий // Строительство и окружающая среда. 2011. Том 46. № 1. С. 3-11.
5. Найхолт А. (ред.). Интерфейсы мозг-компьютер: современные тенденции и приложения. Springer, 2019. Скачок С.В. и др. К вопросу об актуальности роли информационных технологий в процессе обучения дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» // Молодой ученый. 2015. № 6.4 (86.4). С. 112-115.
6. Воронов А.А. Нейроэргономика: проектирование человеко-машинных систем с учетом когнитивных процессов. М.: Техносфера, 2019. 312 с.
7. Щербаков Ю.С. Разработка информационных технологий для обеспечения управления безопасностью жизнедеятельности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2008. №2.

References

1. Choi J.-H., Loftness V. The study of human skin temperature as a biosignal indicating general thermal sensations // Construction and the environment. 2012. Volume 58. pp. 258-269.
2. Liu S., Schiavon S., Das H. P., Jin M., Spanos K. J. Models of personal thermal comfort with wearable sensors // Construction and environment. 2019. Volume 162. pp. 106281.
3. Kim J., Schiavon S., Brager G. Personal comfort models – a new paradigm of thermal comfort for tenant-oriented environmental control // Construction and Environment. 2018. Volume 130. pp. 96-106.
4. Daum D., Haldi F., Morel N. Personalized thermal comfort indicator for building control // Construction and the environment. 2011. Volume 46. No. 1. pp. 3-11.
5. Nyholt A. (ed.). Brain-computer interfaces: current trends and applications. Springer, 2019. S.V. Skachok and others. On the question of the relevance of the role of information technology in the learning process of the discipline "Safety of life" // Young Scientist. 2015. No. 6.4 (86.4). pp. 112-115.

6. Voronov A.A. Neuroergonomics: designing human-machine systems taking into account cognitive processes. Moscow: Technosphere, 2019. 312 p.
7. Shcherbakov Yu.S. Development of information technologies for life safety management // Interexpo Geo-Siberia. 2008. №2.