

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПЛАТФОРМА МУЛЬТИКОМПАРТМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА

И.И. Ермакова

*Международный научно-учебный центр информационных технологий
и систем НАН Украины и МОН Украины*

Представлена информационная платформа мультикомпаратментальных моделей, которая позволяет прогнозировать динамику изменения основных параметров, характеризующих термofизиологическое состояние человека при различных внешних воздействиях. Анализ приведенных результатов моделирования позволяет выявить и оценить возможные риск-факторы, угрожающие здоровью человека. По окончании эксперимента информационная платформа делает заключение о резервных возможностях организма и предупреждает об опасности их исчерпания. Приведены примеры использования информационной платформы для решения практических задач и анализа полученных результатов.

Надано інформаційну платформу мультикомпаратментальних моделей, яка дозволяє прогнозувати динаміку зміни основних параметрів, що характеризують термofізіологічний стан людини за різних зовнішніх впливів. Аналіз приведених результатів моделювання дозволяє виявити і оцінити можливі ризик-фактори, які загрожують здоров'ю людини. Після закінчення експерименту інформаційна платформа робить висновок про резервні можливості організму і попереджає про небезпеку їх вичерпання. Наведено приклади використання інформаційної платформи для вирішення практичних завдань і аналізу отриманих результатів.

ВВЕДЕНИЕ

Идея создания модели терморегуляции человека принадлежит Николаю Михайловичу Амосову. Обеспечение температурного гомеостаза относится к магистральным процессам жизнеобеспечения организма. В результате обменных процессов образуется тепло и его необходимо немедленно отвести в среду. Температура тела поддерживается на одном уровне благодаря взаимосвязанной работе практически всех физиологических систем организма, обеспечивающих отдачу тепла в среду. Поэтому, когда речь идет о системе терморегуляции, то имеется в виду функциональная система, которая всякий раз формируется в зависимости от внешних или внутренних возмущений. Задача была сформулирована в рамках построения модели физиологических систем и имела рабочее название «модель внутренней сферы организма человека» [1]. Но время шло, и, как это часто бывает в научных исследованиях, от общего пришлось вернуться к частному. Развитие, улучшение и расширение возможностей модели терморегуляции человека были продиктованы временем. К настоящему моменту разработан класс математических динамических моделей теплообразования, теплопереноса и теплообмена человека со средой. С помощью этого класса моделей можно решать множество теоретических и практических задач,

связанных с термoфизиологическими процессами человека [2].

ЦЕЛЬ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Информационная платформа — это комплекс информационных модулей, построенных на базе математических мультикомпарментальных моделей терморегуляции человека. Каждый модуль ориентирован на решение определенного класса задач, связанных с теплообменом и терморегуляцией человека в зависимости от среды и воздействия.

Цель работы — показать возможности информационной платформы и результаты решения некоторых задач, связанных с влиянием среды и других внешних факторов на термoфизиологическое состояние человека.

Класс мультикомпарментальных динамических моделей теплообмена и терморегуляции человека описывает теплопродукцию в органах и тканях, теплоперенос кровотоками, кондукцию, конвекцию, излучение, испарение с кожи и верхних дыхательных путей, афферентные и эфферентные терморегуляторные процессы. В основе структуры моделей находится компармент. Компармент обладает источником энергии, способностью принимать и передавать тепло соседним компартаментам и обмениваться энергией со средой. Набор компарментов и задание связей между ними определяет характер и степень аппроксимации тела человека и физиологических процессов, происходящих в нем. В качестве единичного компартамента взят объем цилиндрической формы для представления всех частей тела и сферы для головы. Каждый компармент соответствует определенному органу, части тела или ткани организма. Модели учитывают анатомические и физиологические параметры человека: вес, рост, площадь поверхности тела, биофизические характеристики тканей и органов, метаболизм, потребление кислорода, кровотоки, легочную вентиляцию, коэффициенты теплопереноса и теплообмена, сердечный выброс, потоотделение, потери жидкости и др. [2–4].

Математическое описание класса моделей представляет собой систему дифференциальных уравнений, количество которых зависит от характера выбранной аппроксимации. Чем больше компарментов, тем детальнее моделирование процессов теплообразования, теплопереноса, теплообмена со средой, кровообращения, дыхания, водно-солевого обмена и др.

Проведение вычислительных экспериментов на модели позволяет получить переходные и установившиеся режимы более 500 физиологических переменных. Вывод результатов осуществляется в виде графиков, таблиц и паттернов кожных температур. Предусмотрена возможность сохранения условий и результатов вычислительных экспериментов, их автоматического анализа, вывода на экран заключения о возможности дальнейшего пребывания человека в выбранных условиях, получение практических рекомендаций с целью предупреждения опасных ситуаций (рис. 1).

С помощью информационной платформы можно исследовать влияние среды на человека, адаптации, физической нагрузки различной мощности и длительности, одежды и защитного снаряжения, воздействие

электромагнитного поля радиочастотного и ультразвукового диапазонов, температурного комфорта в помещении и др. [5–11]. Платформа обладает свойством универсальности и позволяет подключать новые модели.

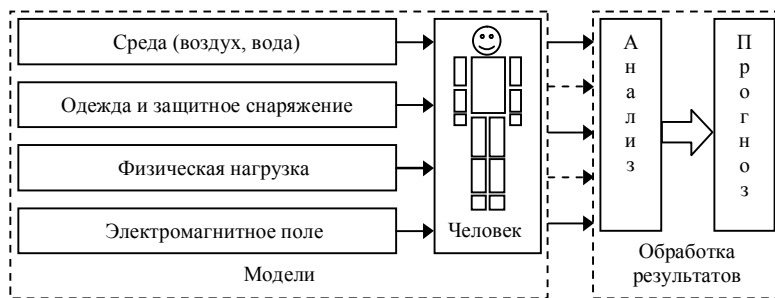


Рис. 1. Структурная схема информационной платформы для прогноза функционального состояния человека

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа в жарких условиях среды. В связи с изменением климата на планете жара становится первостепенным экстремальным фактором. В новой среде организм стремится перестроить свои функции, но человек не в состоянии полностью приспособиться к влиянию экстремальных условий, что ведет к нарушению жизнедеятельности организма и развитию заболеваний. Поэтому обеспечение безопасной жизнедеятельности человека в жарких условиях среды относится к актуальным задачам современности. Эффективность терморегуляции зависит от агрессивности среды — температуры и влажности воздуха, а также от одежды, в которой работает человек.

В жарких условиях существует единственный путь отвода тепла в среду — испарение пота с поверхности тела, к сожалению, других возможностей эволюция не представила. Этот путь отведения тепла из организма очень эффективен, но всегда присутствует угроза дегидратации организма. С помощью информационной платформы можно прогнозировать потери влаги в выбранных условиях и тем самым предусмотреть угрозу обезвоживания организма [8, 12, 13].

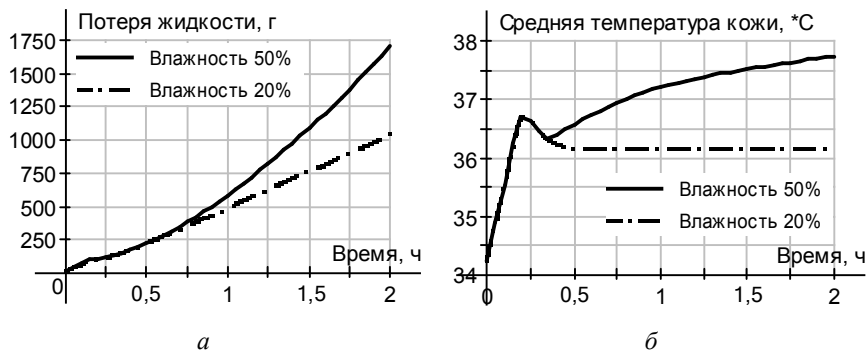


Рис. 2. Динамика потерь влаги и средней температуры кожи при работе в жарких условиях

Ниже приводятся результаты моделирования пребывания человека в жарких условиях среды в защитном костюме. Человек выполняет физическую нагрузку мощностью 300 Вт на открытом воздухе в течение двух часов. Температура 40 °С, скорость движения воздуха 1 м/с, относительная влажность 50 % и 20 % [14].

Результаты моделирования показали, что при влажности 20 % организм за два часа теряет 1050 г жидкости (рис. 2, а), средняя температура кожи устанавливается на отметке 36,1 °С (рис. 2, б). При влажности воздуха 50 % температура кожи возрастает до 37,7 °С, человек теряет 1700 г жидкости, что более 2 % массы тела. Это угроза обезвоживания организма. Платформа выдает сигнальное предупреждение о принятии неотложных мер — рекомендует прекратить работу и выпить воды.

Для оценки степени перегрева платформа рассчитывает индекс тепловой напряженности человека (Heat Stress Index — HSI) [15]:

$$HSI = \frac{E_r}{E_p} \cdot 100 \%,$$

где E_r — требуемое испарение с поверхности кожи для поддержания температурного гомеостаза человека; E_p — максимально допустимое испарение в данных условиях среды.



Рис. 3. Индекс тепловой напряженности

При работе в защитном костюме индекс HSI возрастает от 69 % в сухих жарких условиях до 265 % в жарких влажных условиях, что говорит о тепловом стрессе (рис. 3).

Адаптация к жарким условиям среды. Адаптация к жаре происходит при участии практически всех вегетативных систем человека. Конгломерат систем с жесткой иерархической структурой и сложным алгоритмом взаимодействия обеспечивает бесперебойную работу организма, приспособливая его к жаре. Адаптация к жаре сопровождается значительными тратами энергии, а также перемещением энергетических и информационных потоков в организме человека.

Адаптационные возможности человека можно воспроизводить на информационной платформе, изменяя количественные характеристики афферентных (обратная связь) и эфферентных (регулирующие реакции организма) звеньев. Чувствительность центра терморегуляции и пороги

возбуждения определяют способность организма адаптироваться к окружающей среде. В зависимости от того, в какой момент начнутся регулирующие реакции, в данном случае — увеличение кровотока в коже и испарение пота с поверхности кожи, и с какой силой ответит организм на воздействие, произойдут соответствующие изменения в механизмах адаптации.

При моделировании исследовалась гипотеза, согласно которой адаптация организма к жаре при выполнении физической нагрузки выражается в изменении количественных характеристик основных регулирующих реакций — пороговых температур и коэффициентов усиления (чувствительностей) регулирующих контуров [16].

Условия модельных экспериментов: человек выполняет физическую нагрузку мощностью 600 Вт на открытом воздухе в течение одного часа. Температура воздуха равна 45 °С, влажность воздуха — 20 %, скорость движения воздуха — 1 м/с. Человек одет в спортивную форму.

В контрольном эксперименте (без адаптации) пороговая температура мозга 37 °С, чувствительность центра терморегуляции к изменению этой температуры 500 ккал/ч, а к температуре кожи 50 ккал/ч. У адаптированного субъекта пороговая температура мозга меньше (36,8 °С), а чувствительности больше: центрального контура — 900 ккал/ч, а периферического — 90 ккал/ч.

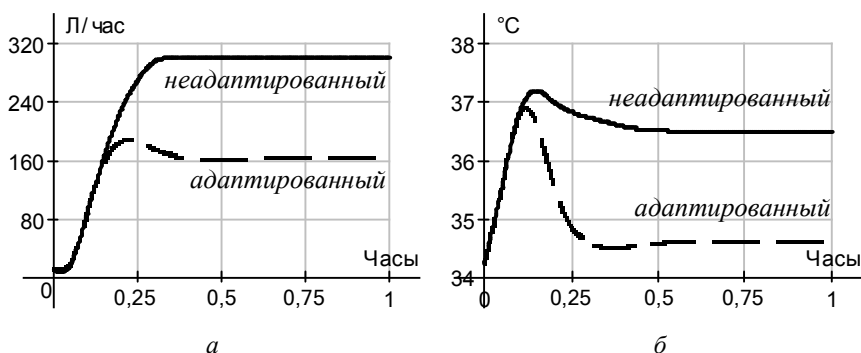


Рис. 4. Динамика кожного кровотока (а) и средней температуры кожи (б)

Результаты моделирования показали, что адаптация качественно изменяет термофизиологическое состояние человека, уменьшая негативное влияние жары. У человека, адаптированного к жаре, скорость потоотделения 1220 г/ч, что выше, чем у неадаптированного (1060 г/ч). В результате интенсивного испарения с поверхности кожи перегрев у адаптированного субъекта значительно меньше, что видно по температуре крови, которая на 0,7 °С ниже, чем у неадаптированного. Эффект адаптации виден также по кожному кровотоку и средней температуре кожи (рис. 4). При адаптации кровотоков в коже равен 164 л/ч, средняя температура кожи — 34,6 °С. В контрольном эксперименте кожный кровоток равен 300 л/ч, температура кожи 36,5 °С. У адаптированного субъекта рост кровотока в коже и потоотделение начинаются раньше и происходят интенсивнее, что и является адаптацией к жаре.

Защитное снаряжение пожарных. Задача была предложена

австралийскими коллегами, разрабатывающими защитное снаряжение для пожарных. Необходимо было выбрать костюм, в котором функциональное состояние пожарных лучше [10, 17, 18].

Условия модельных экспериментов: два пожарных ансамбля А и В; нагрузка — 150 Вт и 300 Вт; температура воздуха — 30 °С, относительная влажность — 20 %, скорость движения воздуха — 1 м/с; продолжительность эксперимента — 2 часа.

Оба ансамбля состоят из экипировочного шлема, куртки, брюк, полностью обшитых кожей ботинок и непромокаемых кожаных перчаток. Нижнее белье — 100 % хлопок. Шлем, ботинки, перчатки и нижнее белье одинаковы для обоих ансамблей, а материалы куртки и брюк варьировались (табл. 1).

Таблица 1

Текстильные материалы для экспериментальных ансамблей А и В

Характеристики материалов	Ансамбль А	Ансамбль В
Количество текстильных слоев	3	3
Средняя теплоизоляция, м ² К/Вт	0,203	0,053
Среднее испарительное сопротивление, м ² Па/Вт	23,105	12,241
Средний вес на единицу площади, г/м ²	576	588
Средняя толщина, мм	1,30	1,38

Результаты моделирования показали, что при легкой нагрузке (150 Вт) тепловое состояние пожарных в обоих ансамблях находится в диапазоне физиологического теплового комфорта (рис. 5).

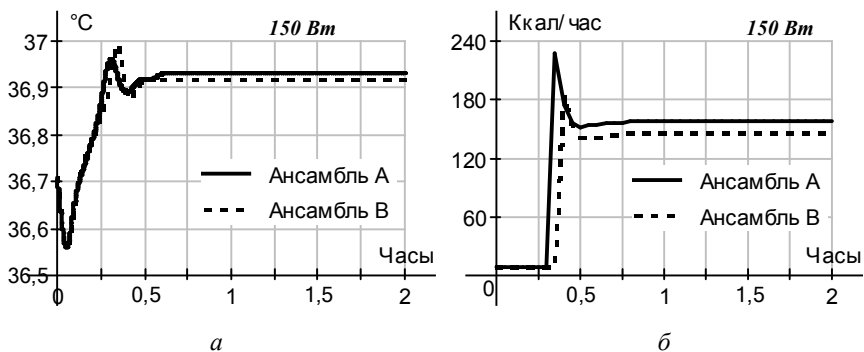


Рис. 5. Динамика температуры крови (а) и испарения пота (б) пожарных

Во время умеренной нагрузки (300 Вт) показатели сердечнососудистой и терморегуляторной систем значительно увеличились и появились существенные различия между значениями физиологических параметров пожарных, одетых в ансамбли А и В. Частота сердечных сокращений в ансамбле А на 16 уд/мин выше, чем в ансамбле В (рис. 6, а), и часть пота стекает, а не испаряется (рис. 6, б). Процесс потоотделения не эффективен с точки зрения охлаждения тела. У пожарных в ансамбле А к концу эксперимента общие потери воды составили более 2 % веса тела, что означает угрозу обезвоживания организма.

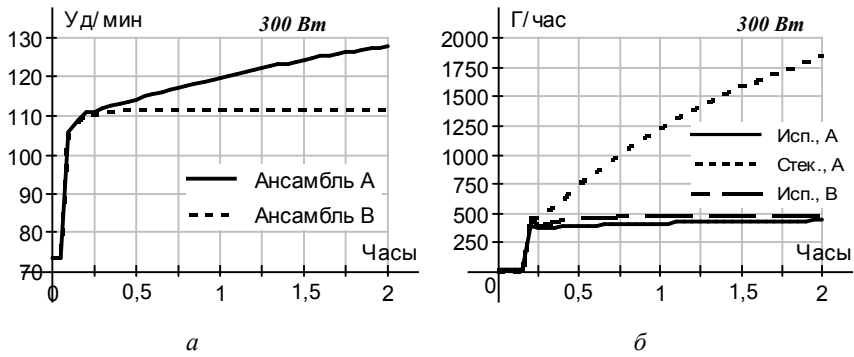


Рис. 6. Динамика частоты сердечных сокращений (а); скорости испарившегося и стекшего пота (б)

Основная причина различного влияния ансамблей защитной одежды А и В на терморегуляторные и сердечнососудистые реакции пожарных при умеренной активности — проницаемость защитной одежды. Испарительное сопротивление ансамбля А практически вдвое больше, чем ансамбля В (см. табл. 1). При легкой нагрузке (150 Вт) оба ансамбля одежды обеспечивают необходимые условия для испарения пота, чтобы поддерживать температуру ядра в сухой жаркой среде. Но во время умеренной нагрузки (300 Вт) при тех же условиях ансамбль А ограничивает испарение пота с кожи через ткань в окружающую среду. Это приводит к увеличению температуры ядра, частоты сердечных сокращений и угрозе обезвоживания организма.

Таким образом, с помощью информационной платформы удалось оценить влияние защитной одежды на температурный комфорт пожарных и предложить лучший вариант снаряжения.

Влияние электромагнитного поля радиочастотного диапазона на человека. Одним из методов лечения онкологических заболеваний является электромагнитная гипертермия человека в радиочастотном диапазоне. Гипертермия вызывается аппликаторами емкостного типа, которые излучают электромагнитное поле в диапазоне частот от единиц МГц до единиц ГГц. Данный модуль информационной платформы предназначен для прогноза эффекта общей, региональной и локальной гипертермии. Требования к построению модуля были сформулированы на основе анализа существующих технических средств, применяемых в медицине [19, 20].

Поглощенная доза электромагнитного излучения тканями человека определяется мощностью и частотой электромагнитного поля, характером распространения электромагнитной волны, биофизическими свойствами тканей, размерами и расположением облучаемого участка [21].

Анализ моделирования региональной гипертермии человека в области туловища при частоте воздействия 100 МГц, мощности излучателя 80 Вт/м^2 и частоте воздействия 450 МГц, мощности излучателя 240 Вт/м^2 с наблюдениями на людях, и с результатами других исследователей доказал адекватность предложенных математических моделей для прогноза эффекта электромагнитного поля радиочастотного диапазона на человека [22].

Фрагмент платформы для моделирования локальной гипертермии человека в области туловища человека показан на рис. 7.

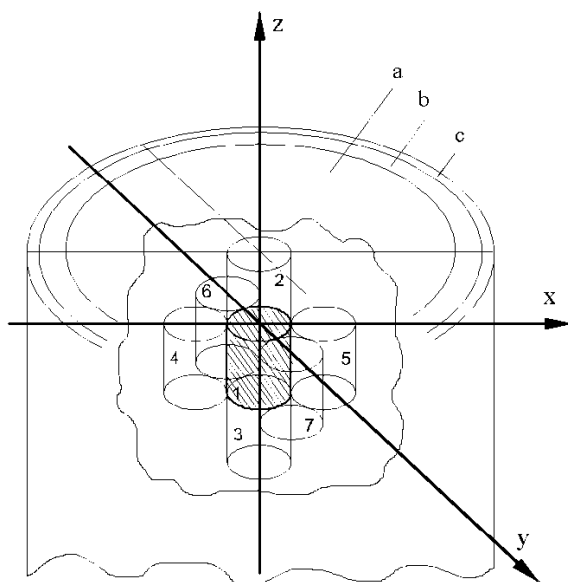


Рис. 7. Моделирование локальной гипертермии. Детализация внутренних органов человека на n компарментов: a — внутренние органы; b — мышцы; c — кожа; 1 — облучаемый участок; участки 2–7 — смежные с облучаемым участком

Моделирование биофизических и тепловых характеристик опухолевой ткани при локальной радиочастотной гипертермии позволяет получить более точную оценку распределения температур в опухолевой ткани и окружающих здоровых тканях, а также оценить степень требуемого температурного режима в опухоли при данной процедуре.

Бег на длинные дистанции. Любая физическая нагрузка вызывает повышение температуры в скелетных мышцах тела. Поэтому профессиональная спортивная деятельность, которая связана с нагрузками большой мощности, требует особого внимания с точки зрения предупреждения перегрева спортсмена. С помощью информационной платформы был выполнен прогноз функционального состояния бегунов на длинные дистанции в различных условиях окружающей среды.

Условия проведенных модельных экспериментов: спортсмен — мужчина (70 кг, 170 см, 25 лет); скорость бега — 10 км/час, дистанция — 10 км; температура воздуха — $20\text{ }^{\circ}\text{C} \div 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность — $0,2 \div 0,8$. Характеристики одежды (футболка, шорты): теплоизоляция — $0,0066\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, испарительное сопротивление — $0,037\text{ м}^2 \cdot \text{кПа}/\text{Вт}$. Характеристики обуви (кроссовки): теплоизоляция — $0,12\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, испарительное сопротивление — $0,083\text{ м}^2 \cdot \text{кПа}/\text{Вт}$.

Результаты моделирования показали, что функциональное состояние спортсмена во время бега существенно зависит от условий окружающей среды. На рис. 8 (a , b) показаны температура крови и общие потери воды организмом к концу дистанции в зависимости от комбинации температуры и относительной влажности воздуха.

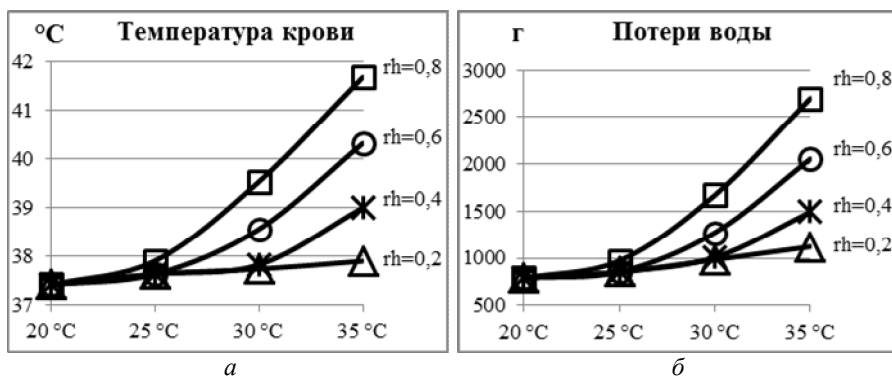


Рис. 8. Температура крови и потери воды организмом

При стандартных для бега на длинные дистанции условиях среды (температура воздуха — 20 °С, влажность — 0,3) терморегуляторное испарение пота с поверхности тела эффективно отводит в среду дополнительное тепло, образующееся при беге. Гипертермия — умеренная (температура крови — 37,4 °С), потери воды (1 % массы тела) не опасны для здоровья спортсмена. При температуре воздуха 35 °С и влажности 0,4 испарение пота обеспечивает теплоотдачу 597 ккал/час, что явно недостаточно при теплопродукции бегуна 731 ккал/час. В результате часть пота испаряется, а часть стекает без испарения и не оказывает терморегуляторного эффекта. Это приводит к росту температуры крови до 39 °С к концу дистанции и потерям воды до 2 % массы тела. При этой же температуре воздуха, но *повышенной влажности* (0,8) среда допускает испарение пота с поверхности тела только 427 ккал/час, в результате чего к концу дистанции температура крови возрастает до 41,7 °С, а общие потери воды составляют 4 % массы тела. Наблюдаемая существенная гипертермия и дегидратация организма говорит о необходимости прекращения бега и принятия мер компенсации.

Предварительный прогноз, выполняемый с помощью информационной платформы, может иметь практическое значение при выборе условий соревнований.

ВЫВОДЫ

Информационная платформа мультикомпарментальных моделей позволяет прогнозировать динамику изменения основных параметров, характеризующих термofизиологическое состояние человека в широком диапазоне внешних воздействий.

Анализ приведенных результатов моделирования позволяет выявить и оценить возможные риск-факторы, угрожающие здоровью человека. По окончании эксперимента информационная платформа делает заключение о резервных возможностях организма и предупреждает об опасности их истощения.

Предварительный прогноз, выполняемый с помощью платформы, показывает *временной диапазон безопасного пребывания человека* в

зависимости от сочетания мощности и длительности физической нагрузки, характеристик среды, термоизоляционных свойств одежды и защитного снаряжения.

1. Амосов Н.М. Модель внутренней сферы организма человека. / Н.М. Амосов. — К. : Наукова думка. — 1978. — С. 246.
Amosov N.M. *Model of inner sphere of human body*. Kyiv: Naukova Dumka, 1978. 246 p.
2. Ермакова И.И. Математическое моделирование процессов терморегуляции у человека. / И.И. Ермакова. — М. : ВИНТИ, 1987. — 137 с.
Yermakova I. *Mathematical modeling of human thermoregulation*. Moscow: VINITI, 1987. 137 p.
3. Ермакова И.И. Температурный гомеостаз на уровне организма / И.И. Ермакова // Гомеостаз на различных уровнях организации биосистем. — Новосибирск : Наука, 1991. — С. 75–84
Yermakova I. Temperature homeostasis — at the organism level. *Homeostasis at different levels of biological systems*. Novosibirsk: Nauka, 1991, pp. 75–84.
4. Єрмакова І.І. Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні : монографія (колективна). — К. : Наукова думка, 2010, — 1007 с.
Yermakova I. *Status and prospects of science in Ukraine*. Monograph (shared). Kyiv: Naukova Dumka, 2010. 1007 p.
5. Ермакова И.И., Динамическая модель оценки температурного комфорта человека / И.И. Ермакова, А.И. Богатенкова. // Электроника и связь. Тематический Выпуск «Проблемы электроники». — 2008. — Ч. 2. — С. 81–85.
Yermakova I., Bogatenkova A. Dynamic model for evaluation of human thermal comfort. *Electronics and communications. Thematic Issue "Problems of Electronics"*, 2008, Part 2, pp. 81–85.
6. Candas V., Yermakova I. *Computer simulation of human physical activity in moderate heat. Manikins and Modelling*. Coimbra, Portugal: Ed. M. Silva, 2008.
7. Ермакова И.И. Информационные технологии для моделирования взаимодействия человека со средой / И.И. Ермакова, А.И. Богатенкова, К.К. Духновская, Ю.П. Тадеева // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники». — К. : НТУУ «КПИ», 2009. — Ч. 1. — С. 177–180.
Yermakova I., Bogatenkova A., Dukhovskaya K., Tadejeva J. Information technology for simulation of human interaction with environment. *Electronics and communications. Special Issue "Problems of electronics," Part 1*. Kiev: NTU "KPI", 2009, pp. 177–180.
8. Yermakova I., Kovtun S., Bereznenko S. Application of computer simulator for prediction of thermo-physiological responses of human subject in barrier clothing in extreme conditions. Monograph. *Innovative Materials & Technologies in Made-up Textile Articles and Footwear*. 2008, Lodz, pp. 190–195.
9. Yermakova I., Dukhovskaya K., Ivanushkina N., Nikolaienko N. Information technology for prediction of human state during exercise. *13th Int. Conf. on Environmental Ergonomics*. Boston, Massachusetts, USA, 2009, pp. 343–346.
10. Yermakova I., Troynikov O., Nawaz N. Material and engineering design for human performance and protection in extreme hot conditions. *Advances in Engineering Materials, Product and Systems Design*. Trans. Tech. Publications, Switzerland, 2013, vol. 633, pp. 169–180.
11. Yermakova I., Solopchuk Y. Heat production, heat transfer and heat exchange in man during water immersion: mathematical modeling. *XXXIII Int. scientific conf. electronics and nanotechnology. Institute of Electrical and Electronics Engineers, catalog number: CFP13O5U-PRT*, 2013, pp. 290–292.
12. Yermakova I., Bogatenkova A., Nikolaienko N., Zilberter T. Prediction and prevention of physiological risk factors during intensive exercise in a hot environment. *Int. Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 2009, vol. 22, 84 p.
13. Yermakova I. Intense Exercise in a Dry Hot Environment. *Int. Congress of Medicine in Space and Extreme Environments*, Berlin, Germany, October 18–21, 2010, 555 p.

14. Динамическая модель оценки риск-факторов при работе человека в жарких условиях среды // И.И. Ермакова, А.Ю. Николаенко, А.Г. Григорьян, Л.А. Худякова // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»*. 2011. — № 3. — С. 146–149.
Yermakova I., Nikolaienko A., Grigorian A., Hudiakova L. Dynamic model for assessment risk factors during human work in hot environment. *Electronics and communications. Special Issue “Electronics and Nanotechnology”*, 2011, no. 3, pp. 146–149.
15. Yermakova I., Nikolaienko A., Grigorian A. Dynamic model for evaluation of risk factors during work in hot environment. *Journal of Physical Science and Application*, vol. 3 (4), 2013, pp. 238–243.
16. Yermakova I., Bortkiewicz A., Gadzicka E., Nikolaienko N. Modeling of human adaptation to heat during exercise. *8th Int. meeting for manikins and modeling*. Canada, 23–26 august, 2010, 243 p.
17. Yermakova I., Dukchnovskaya K., Nikolaienko A., Troynikov O., Nawaz N. Dynamic evaluation of fire fighters thermal responses in different ensembles using mathematical model. *14th Int. Conf. on Environmental Ergonomics*. Greece, Napflio, 2011, pp. 367–372.
18. Yermakova I., Dukchnovskaya K., Nikolaienko A., Troynikov O., Nawaz N. Influence of exercise intensity on thermophysiological responses of firefighters wearing different firefighters protective clothing ensembles. *5th ESPC and Nokobetef 10. Future of protective clothing: Intelligent or not*. Valencia, Spain, 29–31 May, 2012, 230 p.
19. Ермакова И.И. Моделирование гипертермии человека при воздействии высокочастотного электромагнитного поля / И.И. Ермакова, Ю.П. Тадеева // *УСиМ*. — 2005. — № 4. — С. 48–52.
Yermakova I., Tadejeva J. Modeling of human hyperthermia under high-frequency EMF. *USIM*, 2005, no 4. pp. 48–52.
20. Тадеева Ю.П. Эффект электромагнитной гипертермии радиочастотного диапазона / Ю.Н. Бондаренко, Ю.П. Тадеева, И.И. Ермакова // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники»* — 2005. — Ч. 1. — С. 110–112.
Bondarenko N., Tadejeva J., Yermakova I. Effect of electromagnetic radiofrequency hyperthermia. *Electronics and Communication. Thematic Issue “Problems of electronics”*, Part 1, 2005, pp. 110–112.
21. Ермакова И.И. Моделирование поглощенной дозы электромагнитного излучения при гипертермии человека / И.И. Ермакова, Ю.П. Тадеева // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники»* — 2005. — Ч. 1. — С. 110–112.
Yermakova I., Tadejeva J. Simulation of absorption dose in human hyperthermia. *Electronics and Communication. Thematic Issue “Problems of electronics”*, Part 1, 2005, pp. 110–112.
22. Ермакова И.И. Эффект региональной электромагнитной гипертермии: результаты моделирования / И.И. Ермакова, Ю.П. Тадеева, Н.Г. Иванушкина // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники»* — 2007. — Ч. 1 — С. 132–136.
Yermakova I., Tadejeva J., Ivanushkina N. Effect of electromagnetic regional hyperthermia: results of the simulation. *Electronics and Communication. Thematic Issue “Problems of electronics”*, Part 1, 2007, pp. 132–136.

Получено 04.11.2013