

Математическое моделирование физиологических показателей при травматическом шоке, вызванном взрывной травмой нижних конечностей

Толмачев И.В.^{1,4}, Анисин А.В.², Бала А.М.², Вражнов Д.А.¹, Шаповалов А.В.¹,
Котловский М.Ю.⁴, Лаптев В.В.³, Бразовский К.С.^{1,3}

¹ Сибирский государственный медицинский университет
Россия, 634050, г. Томск, Московский тракт, 2

² Военно-медицинская академия (ВМА) им. С.М. Кирова
Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ)
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

⁴ Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения
(ЦНИИОиИЗ)
Россия, 127254, г. Москва, ул. Добролюбова, 11

РЕЗЮМЕ

Целью настоящего исследования является применение интегративных физиологических математических моделей для моделирования физиологических показателей при травматическом шоке, вызванном взрывной травмой нижних конечностей.

Материалы и методы. На первом этапе математического моделирования использовались интегративные физиологические модели с сосредоточенными параметрами, а на втором этапе – нейронные сети.

Результаты. Разработана система поддержки принятия врачебных решений, позволяющая по данным физиологического мониторинга определять интенсивность кровопотери при минно-взрывной травме нижних конечностей.

Заключение. Разработанные подходы позволяют частично решить проблему, связанную с невозможностью накопления достаточного количества медицинских данных для конкретного человека с целью создания адекватной персонализированной модели поддержки принятия врачебных решений.

Ключевые слова: математическое моделирование, травматический шок, кровотечение, системы поддержки принятия врачебных решений

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

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Толмачев И.В., Анисин А.В., Бала А.М., Вражнов Д.А., Шаповалов А.В., Котловский М.Ю., Лаптев В.В., Бразовский К.С. Математическое моделирование физиологических показателей при травматическом шоке, вызванном взрывной травмой нижних конечностей. *Бюллетень сибирской медицины*. 2023;22(4):122–129. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2023-4-122-129>.

Mathematical modeling of physiological parameters in traumatic shock caused by lower limb blast injury

Tolmachev I.V.^{1,4}, Anisin A.V.², Bala A.M.², Vrazhnov D.A.¹, Shapovalov A.V.¹, Kotlovskiy M.Yu.⁴, Laptev V.V.³, Brazovskiy K.S.^{1,3}

¹ Siberian State Medical University
2, Moscow Trakt, Tomsk, 634050, Russian Federation

² S.M. Kirov Military Medical Academy
6, Akademika Lebedeva Str., Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

⁴ Federal Research Institute for Healthcare Organization and Informatization
11, Dobrolyubova Str., Moscow, 127254, Russian Federation

ABSTRACT

The aim of this study was to apply integrative physiological mathematical models to simulate physiological parameters in traumatic shock caused by lower limb blast injury.

Materials and methods. At the first stage of mathematical modeling, we applied lumped parameter integrative physiological models, and at the second stage we used neural networks.

Results. We developed a clinical decision support system that allows to determine the intensity of blood loss in lower limb blast injuries according to physiological monitoring data.

Conclusion. The developed approaches make it possible to partially solve the problem associated with the impossibility of accumulating a sufficient amount of medical data for a specific person to create an adequate personalized clinical decision support system.

Keywords: mathematical modeling, traumatic shock, bleeding, clinical decision support systems

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflict of interest related to the publication of this article.

Source of financing. The authors state that they received no funding for the study.

For citation: Tolmachev I.V., Anisin A.V., Bala A.M., Vrazhnov D.A., Shapovalov A.V., Kotlovskiy M. Yu. , Laptev V.V., Brazovskiy K.S. Mathematical modeling of physiological parameters in traumatic shock caused by lower limb blast injury. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2023;22(4):122–129. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2023-4-122-129>.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка степени тяжести и прогнозирование развития травматического шока при минно-взрывной травме является актуальной задачей современной военной медицины. Взрывная травма является особым видом огнестрельной травмы, характеризующейся совокупностью повреждений, возникающих от воздействия поражающих факторов взрыва. Взрывные повреждения требуют особого подхода к процессу оценки тяжести выявленных повреждений и состояния раненых, что является залогом эффек-

тивности проведения лечебно-эвакуационных мероприятий [1].

Развитие травматического шока определяется видом травмы, объемом механического повреждения тканей и органов, величиной кровопотери и гиповолемией, интенсивностью боли и реакцией – ответом организма на агрессию, продолжительностью патологического состояния. Патогенетически травматический шок является сложной многокомпонентной реакцией организма на тяжелое механическое повреждение и рассматривается клиницистами как первый этап травматической болезни. Основной

патогенетический элемент шока – генерализованная тканевая гипоперфузия, нарушающая гомеостатические механизмы и приводящая к необратимым клеточным повреждениям. Гипоперфузия тканей влечет за собой развитие необратимых метаболических, биохимических, энзиматических клеточных нарушений, а при отсутствии адекватного лечения – летальный исход [2].

Понятия «тяжесть травмы», «тяжесть повреждения» и «тяжесть состояния» взаимосвязаны, но не идентичны. Тяжесть повреждения зависит от его локализации, обширности анатомических разрушений и функциональной значимости пострадавшего органа или анатомо-функциональной области. Тяжесть состояния связана с тяжестью повреждения и определяется степенью выраженности функциональных расстройств, временем, прошедшим с момента травмы, исходным состоянием пострадавшего и объемом медицинской помощи. Высокую эффективность показали методы оценки тяжести травмы с использованием комбинированных подходов, включающих параметры тяжести повреждений (морфологические признаки) и параметры тяжести состояния (функциональные признаки) [3–5]. В настоящей статье акцент сделан на оценке функциональных признаков, что подразумевает дальнейшее расширение разрабатываемой методологии дополнительными критериями оценки тяжести повреждений.

Многочисленные классификации острой кровопотери с развитием шоковых состояний в конце концов сводятся к обсуждению роли двух компонентов нарушения кислородно-транспортной функции крови. Первый связан с нарушением сократимости миокарда вследствие нескольких причин: гипоксии, ишемии миокарда, влияния миокардиодепрессирующих факторов различной этиологии, сопутствующей патологии, применяемой тактики интенсивной терапии и других. Второй, наиболее обсуждаемый и напрямую обусловленный кровопотерей, – с первичными нарушениями кровообращения вследствие дефицита объема циркулирующей крови, и поэтому при развитии метаболических, микроциркуляторных нарушений носит название гиповолемического шока. Однако причина возникновения шока вследствие острой кровопотери имеет первостепенное практическое значение только на ранних стадиях процесса, так как впоследствии из-за сходности патофизиологических механизмов утрачивает свою специфичность, связанную с этиологическим фактором [6]. Исходя из вышесказанного, применение методов математического моделирования может оказаться полезным для решения задачи разработки системы поддержки принятия врачебных решений

(СППВР) при оценке степени тяжести и прогнозировании развития травматического шока в процессе мониторинга состояния военнослужащего на переломных этапах эвакуации, а также при разработке сценариев для симуляционного обучения.

Целью настоящего исследования является применение интегративных физиологических математических моделей для моделирования физиологических показателей при травматическом шоке, вызванном взрывной травмой нижних конечностей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для моделирования физиологических показателей при травматическом шоке, вызванном взрывной травмой нижних конечностей, использовался многоплатформенный универсальный симулятор физиологии человека Pulse Physiology Platform [7], модифицированный нами для работы. Система используется для обеспечения точного и согласованного физиологического моделирования в реальном времени. Структура разработанной платформы включает основное ядро, представляющее собой базовое программное обеспечение, которое управляет составляющими платформы с помощью интерфейсов. Компонентами платформы являются верифицированные модели физиологических механизмов и фармакокинетические (фармакодинамические) модели. Эти модели относятся к классу математических моделей с сосредоточенными параметрами и построены на основе обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающих механизмы обратных связей.

В отличие от систем, в которых модели с сосредоточенными параметрами обычно используются для моделирования отдельных физиологических функций и поведения, платформа используется для моделирования физиологического состояния организма на основе взаимодействия физиологических функций в каждой отдельной подсистеме.

Сердечно-сосудистая подсистема включает в себя работу сердца и сосудов малого и большого круга кровообращения, а дыхательная подсистема моделирует различные компоненты дыхательных путей легких. Эти две подсистемы взаимодействуют через легочно-капиллярно-альвеолярный барьер, чтобы обеспечить перенос газов. Моделирование включает в себя диффузию за счет парциального давления между жидкостью (кровью) и газом (воздухом). Результатом моделирования являются значения давления и объема в капиллярах и дыхательных путях. Механизмы обратной связи реализованы через барорецепторы. Барорецепторный механизм обеспечивает быстрый отрицательный контроль артериального давления (АД) на основе обратной связи. Падение

АД детектируется барорецепторами и приводит к увеличению частоты сердечных сокращений (ЧСС) и сопротивления сосудов. Эти изменения нужны для поддержания постоянного АД в состоянии покоя путем вычисления симпатического (1) и парасимпатического (2) ответа:

$$\eta_s(P_a) = [1 + P_a / P_{a,s}]^v, \quad (1)$$

$$\eta_p(P_a) = [1 + P_a / P_{a,s}]^{-v}, \quad (2)$$

где v – параметр барорецептора, P_a – среднее АД, $P_{a,s}$ – заданное значение P_a . Эти величины затем используются для расчета изменений ЧСС (HR) (3), эластичности (E) (4), системного сосудистого сопротивления (R) (5) и емкости (C) (6):

$$dHR / dt = -\tau_{HR}^{-1} (-HR + \alpha_{HR} \eta_s(P_a) + \beta_{HR} \eta_p(P_a) + \gamma_{HR}), \quad (3)$$

$$dE / dt = -\tau_E^{-1} (-E + \alpha_E \eta_s(P_a) + \gamma_{HR}), \quad (4)$$

$$dR / dt = -\tau_R^{-1} (-R + \alpha_R \eta_s(P_a) + \gamma_R), \quad (5)$$

$$dC / dt = -\tau_C^{-1} (-C + \alpha_C \eta_s(P_a) + \gamma_C), \quad (6)$$

Здесь HR , E , R , C – относительные величины ЧСС, эластичность, сопротивление сосудов и податливости соответственно; α , β , γ – параметры модели; τ – временные параметры соответствующих процессов. Эти зависящие от времени изменения вводятся в модель сердечно-сосудистой системы путем изменения компонентов с сосредоточенными параметрами, задаются масштабные коэффициенты, определяющие сопротивление сосудов, объем циркулирующей крови и скорость работы сердца.

С точки зрения математического моделирования, объем генерируемых физиологических данных ограничен только вариациями независимых переменных. Поэтому существует принципиальная возможность генерации сколь угодно большого массива данных для последующего обучения модели СППВР. Для тестирования подхода был сгенерирован массив данных, содержащий 10 000 000 записей, включающих изменения физиологических параметров в течение 20 мин: диастолическое артериальное давление (ДАД), систолическое артериальное давление (САД), ЧСС, частота дыхания (ЧД), сатурация крови кислородом (SpO_2), температура при взрывной травме нижних конечностей, сопровождающейся острой кровопотерей различной интенсивности (шаг моделирования скорости кровопотери из нижних конечностей 10 мл/мин). Общий объем сгенерированных данных составил 16,2 Гб данных в формате CSV.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По своей природе разрабатываемая СППВР относится к одному из видов киберфизических систем, подразумевает совокупность физических процес-

сов и систем, компьютерных и других устройств, Интернет-ресурсов и пользователей, согласованно взаимодействующих между собой посредством компьютерных реализаций алгоритмов (протоколов), направленных на решение широкого круга многоцелевых задач в области сетевых технологий. Для визуализации данных в реальном времени было разработано программное обеспечение, позволяющее генерировать модельные сигналы, согласно заданным начальным условиям математической модели (рис. 1).

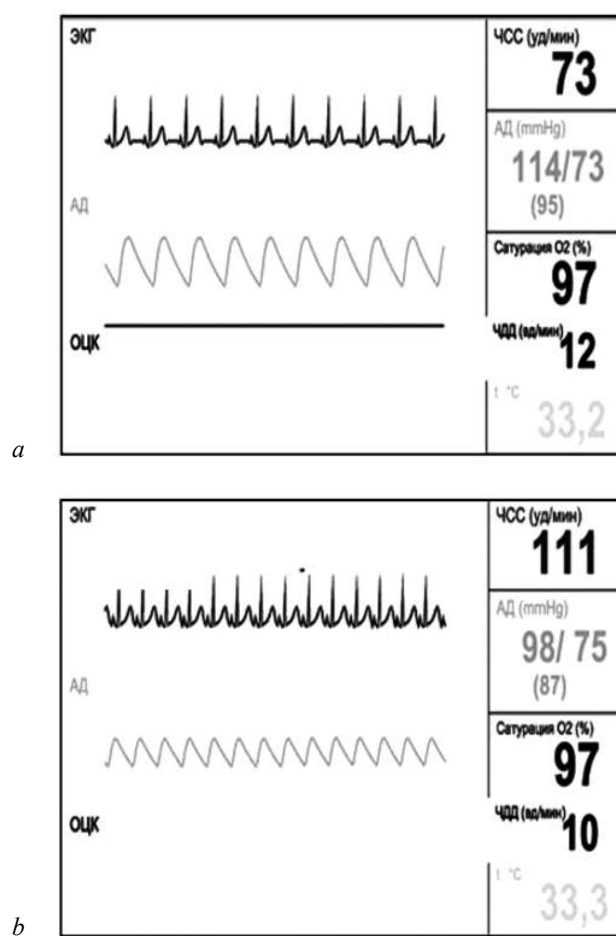


Рис. 1. Пример результатов математического моделирования физиологических показателей при травматическом шоке, вызванном взрывной травмой нижних конечностей: *a* – исходное состояние; *b* – состояние компенсированного травматического шока

Полученные в результате решения прямой задачи математического моделирования физиологические показатели представляют собой массив данных, в котором сопоставлены вариации физиологических параметров в динамике, позволяющие выявить наиболее вероятную комбинацию витальных показателей при различной интенсивности кровопотери.

Разработка итоговой СППВР включает в себя несколько этапов: 1) формирование персонализированной базы данных (БД) обследуемого человека на основе измерения физиологических параметров, моделирование спектра физиологических состояний как в нормальных, так и в критических ситуациях на базе применяемого в системе компьютерного симулятора физиологических функций человека; 2) обучение применяемого в системе классификатора, способного определить характер патологического состояния человека посредством сравнения потока измеряемых физиологических параметров человека с набором записей в персонализированной БД.

Приоритетная задача СППВР состоит в мониторинге измеряемых с помощью датчиков витальных физиологических параметров человека, формировании информационного потока медицинских данных в установленном формате программными средствами, работе программного модуля сравнения информационного потока данных с персонализированной БД с целью своевременного обнаружения критического состояния (КС). В случае обнаружения критического состояния определяется его тип (проводится индексация КС) и информация о КС и его типе передается сообщением ответственному за принятие врачебного решения.

Общая схема разрабатываемой СППВР представлена на рис. 2, 3. В этой системе модуль 1 реализуется на базе программного комплекса Pulse Engine, генерирующего персонализированную БД объекта; модуль 2, выполняющий функцию классификации состояний объекта, реализуется в виде набора глубоких нейронных сетей, обученных по БД объекта. СППВР включает следующие взаимосвязанные структурные элементы: массив X векторов персонализированной БД, полученных измерениями параметров состояния (см. рис. 2).

Модуль 2 выполняет функцию мониторинга функциональных состояний объекта посредством сравнения входного потока измеряемых физиологических параметров объекта, обнаружения КС и его индексацию. В разрабатываемой системе модуль 2 реализуется в виде нейронных сетей. Обучение нейронных сетей, позволяющее определить КС объекта, проводится по набору КС персонализированной БД объекта, генерируемому модулем 1.

Массив входных данных состоит из векторов X первичных данных пациента. Вектор X имеет следующую структуру: $X = (X_1, X_2)$. Здесь X_1 – вектор антропометрических параметров, а X_2 – вектор физиологических параметров пациента.

Компонентами вектора X_1 являются такие параметры, как рост, вес, пол, исходные значения виталь-

ных показателей в покое и при нагрузке. При необходимости перечень входных параметров может быть существенно расширен. В настоящее время большая часть входных параметров (параметры эндокринной системы, систем гемостаза, нервной системы и т.д.) записаны как среднестатистические параметры.

Компонентами вектора X_2 являются: ЧСС (число сокращений/мин); SpO_2 , в норме 95 %; ЧД (число вдохов/мин); АД (мм рт. ст.); ДА; температура ($^{\circ}C$). Рассмотрим более подробно структурные элементы СППВР, представленной на рис. 2.

Подаваемый на вход системы вектор (X) состоит из измеренных параметров состояния пациента. Список физиологических параметров пациента может быть скорректирован в зависимости от конкретных условий применения СППВР.

Модуль 1 выполняет функцию генерации персонализированной БД пациента, состоящей из модельных векторов (Y) состояния пациента в заданном диапазоне изменения параметров модели ($a = (a_1, \dots, a_k)$). В разрабатываемой СППВР эту функцию выполняет Pulse Physiology Platform.

Для заданного набора параметров модели a и входного вектора X модуль 1 генерирует на выходе временной ряд векторов $Y(a, t)$ (информационный поток данных объекта). Временная переменная t с шагом дискретизации δ определяется как характерное время моделируемого физиологического процесса. Например, для кровопотери можно выбрать шаг, равный 1 мин. Шаг δ выбирается «малым» по сравнению с тем следствием, которое он вызывает, т.е. когда моделируемый процесс приводит к изменению состояния объекта (к переходу от нормального состояния к критическому). Временной ряд возникает вследствие того, что, например, процесс кровопотери не сразу приводит к переходу от нормального состояния к критическому (действие кровопотери накапливается).

На рис. 3 блок «Внешний эксперт» выполняет функцию настройки СППВР, которая состоит в задании вектора параметров модели, $a = a_{(j)}$, при котором модуль 1 генерирует вектор поток векторов $Y_{(j)}(a_{(j)}, t)$, представляющих j -е КС объекта. Обозначим его кр. j , например, представим, что значению $j = 1$ соответствует КС пациента, возникающее при кровопотере со скоростью 10 мл/мин.

Модуль 2. Нейронная сеть должна выполнять функцию оценки состояния, в том числе и КС объекта по (тестируемому) входному вектору измеренных параметров состояния объекта. Применение нейросетевых алгоритмов машинного обучения позволяет перейти от математически сложного решения обратной задачи динамических систем через многократное

интегрирование к решению простых алгебраических систем с известной структурой (весовые коэффициенты и функции активации). Входным вектором для нейронной сети является временной ряд векторов $Y(a, t)$, генерируемых модулем 1. Соответственно, на выходе сети получится временной ряд векторов вида $Z_{кр}(t_j) = (h_1(t_j), h_2(t_j), \dots, h_R(t_j))$.

Здесь переменная времени t_j изменяется в масштабе, отличном от масштаба времени t , установ-

ленного в модуле 1. Шаг дискретизации Δ времени t_j больше, чем шаг δ физиологического процесса, например кровопотери, т.е. t_j является «медленным» временем по сравнению с «быстрым» временем t .

Величины $h_1(t_j), h_2(t_j), \dots, h_R(t_j)$ – компоненты вектора $Z_{кр}(t_j)$ – представляют собой вероятности: например, $h_1(t_j)$ – есть вероятность того, что пациент находится в КС 1 во временном интервале $(t_j, t_j + \Delta)$.

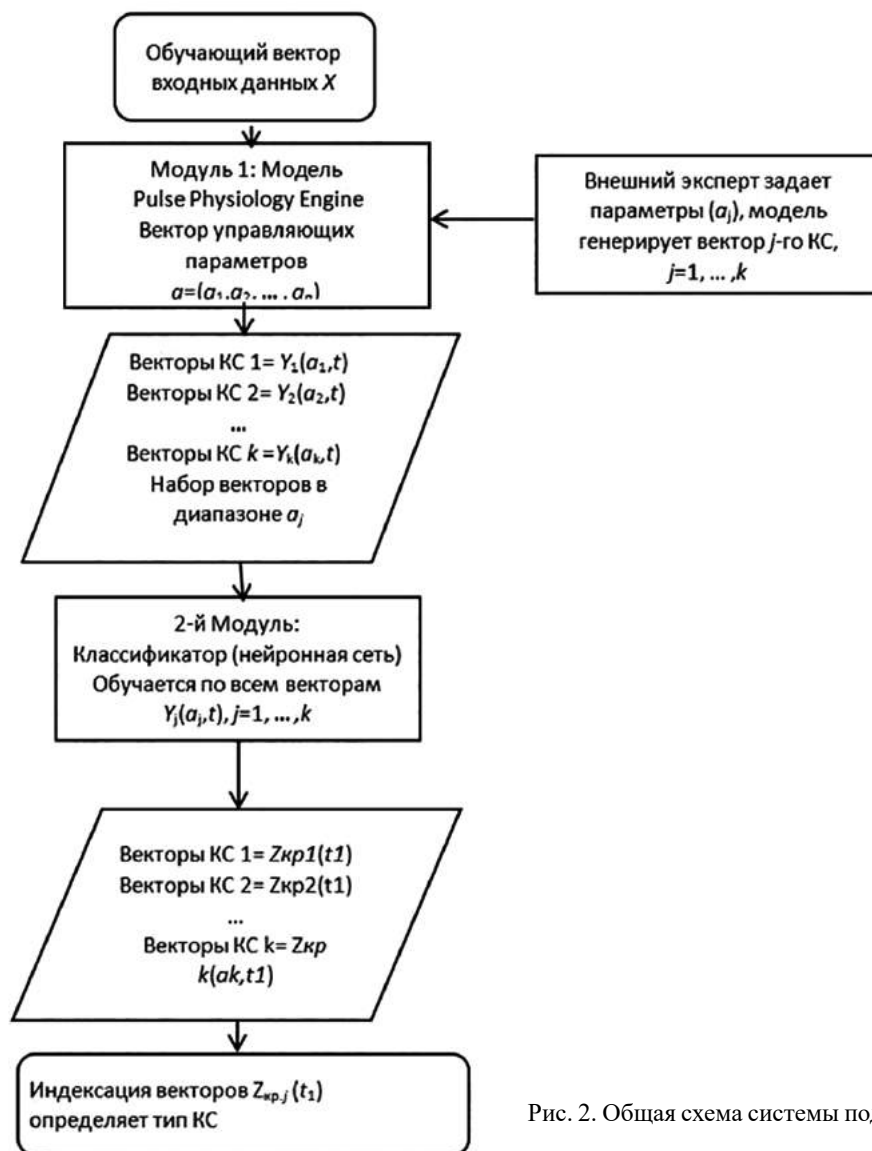


Рис. 2. Общая схема системы поддержки принятия решений

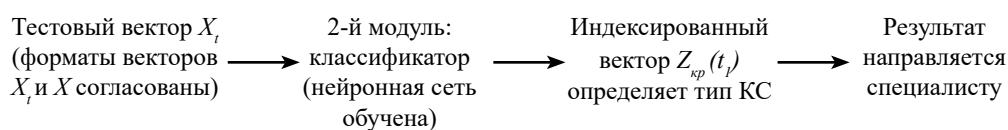


Рис. 3. Схема тестирования системы поддержки принятия решений

В результате операций нейронной сети с персонифицированной БД объекта проводится обучение нейронных сетей. По результатам работы два модуля получают алгоритмы СППВР, представляющие собой модели типа «вход – выход». На вход модели подается массив с витальными показателями, накопленными за фиксированный промежуток времени (60 с). На выходе формируются вектор с данными, содержащий информацию о состоянии объекта, и вычисленные физиологические параметры, обладающие высокой информативностью для медицинского специалиста (скорость кровопотери, объем кровопотери).

Для построения итоговой модели СППВР на основе нейросетевых алгоритмов было разработано программное приложение на языке Python. При помощи созданного на предыдущем этапе аннотированного датасета формируются несколько нейронных сетей: Long short-term memory (LSTM – сети долгой краткосрочной памяти), Autoencoder (автокодировщик), convolutional neural network (CNN – сверточная нейронная сеть). Итоговый алгоритм СППВР выполняет следующие функции: классификация состояний по данным физиологического мониторинга (ЧСС, САД, ДАД, SpO₂, ЧД, температура), восстановление массива данных при условии пропущенных значений. При условии наличия кровотечения – определение скорости кровопотери, объема кровопотери и момента начала кровотечения. Предложено несколько архитектур глубоких нейронных сетей:

1. Сеть LSTM, основная задача – классификация физиологического состояния. Тип рекуррентной нейронной сети, способный обучаться долгосрочным зависимостям. LSTM специально разработана для выявления события в динамически изменяющемся процессе.

2. Сеть Autoencoder, основная задача – восстановление массива данных при условии наличия пропусков, прогнозирование изменения траектории параметров.

3. Сеть CNN, основная задача – вычисление скорости кровопотери, объема кровопотери, момента начала кровопотери. Сверточная нейронная сеть – специализированная архитектура искусственных нейронных сетей, нацелена на эффективное распознавание образов. Разработанный алгоритм позволяет рассчитывать нейронную сеть по выборке смоделированных показателей на языке Python. При оценке качества работы смоделированной структуры получены следующие характеристики: конечная

точность по MSE: 0,992 (99,1%), конечная точность по MAE: 0,997 (98,9%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные подходы позволяют частично решить проблему, связанную с невозможностью накопления достаточного количества медицинских данных для конкретного человека, с целью создания адекватной персонализированной модели поддержки принятия врачебных решений. Предложенный алгоритм в перспективе позволит создать аппаратное решение для оценки нуждаемости в оказании медицинской помощи при взрывной травме нижних конечностей, что особо важно на догоспитальном этапе и в условиях оказания экстренной помощи на этапах медицинской эвакуации. Важной проблемой остаются критерии оценки тяжести повреждений. Сложность включения указанных параметров в математическую модель не позволяет использовать разработанную методологию изолированно. Кроме того, для подтверждения результатов математического моделирования требуется набор клинических данных для верификации модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анисин А.В., Денисов А.В., Шаповалов В.М. Оценка тяжести минно-взрывной травмы нижних конечностей. *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2019;2(21):215–218. DOI: 10.17816/brmma25947.
2. Клинические рекомендации по оказанию медицинской помощи пострадавшим с острой кровопотерей в чрезвычайных ситуациях. М: Всероссийский центр медицины катастроф «Защита», 2013:180.
3. Гуманенко Е.К., Бояринцев В.В., Суворов В.В., Супрун Т.Ю. Объективная оценка тяжести боевой хирургической травмы. Военно-полевая хирургия локальных войн и вооруженных конфликтов. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2011:672.
4. Гуманенко Е.К., Самохин И.М. Военно-полевая хирургия локальных войн и вооруженных конфликтов: руководство. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2011:672.
5. Указания по военно-полевой хирургии МО РФ [электронный ресурс]. URL: https://www.vmeda.org/wp-content/uploads/2016/pdf/ukazaniya_po_vph_2013.pdf
6. Пырегов А.В., Овечкин А.Ю., Петров С.В. Неинвазивный мониторинг общего гемоглобина на основе многоволновой спектроскопии в акушерстве и гинекологии. *Анестезиология и реаниматология*. 2012;6:36–39.
7. Aaron B., Webb J.B., Enquobahrie A., Vicory J., Heneghan J., Hubal R. et al. Pulse Physiology Engine: an Open-Source Software Platform for Computational Modeling of Human Medical Simulation. *SN Comprehensive Clinical Medicine*. 2019;1:362–377. DOI: 10.1007/s42399-019-00053-w.

Информация об авторах

Толмачев Иван Владиславович – канд. мед. наук, руководитель целевой поисковой лаборатории медико-инженерных технологий, Фонд перспективных исследований, СибГМУ, г. Томск, ivantolm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2888-5539>

Анисин Алексей Владимирович – начальник организационно-планового отделения научно-исследовательских (опытно-конструкторских) работ, майор медицинской службы ВМА им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, av.anisin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1526-1778>

Бала Анатолий Михайлович – канд. мед. наук, ВМА им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, amsv@inbox.ru

Вражнов Денис Александрович – науч. сотрудник, целевая поисковая лаборатория медико-инженерных технологий, Фонд перспективных исследований, СибГМУ, г. Томск, denis.vrazhnov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6915-6156>

Шаповалов Александр Васильевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, науч. сотрудник, целевая поисковая лаборатория медико-инженерных технологий, Фонд перспективных исследований, СибГМУ, г. Томск, shpv@phys.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2170-1503>

Котловский Михаил Юрьевич – д-р мед. наук, гл. науч. сотрудник, отдел научных основ организации здравоохранения, ЦНИИОиИЗ, г. Москва, m.u.kotlovskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1037-2567>

Лаптев Владислав Витальевич – аспирант, НИ ТПУ, г. Томск, lptwlad1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8639-8889>

Бразовский Константин Станиславович – д-р техн. наук, науч. сотрудник, целевая поисковая лаборатория медико-инженерных технологий, Фонд перспективных исследований, СибГМУ, г. Томск, bks_2005@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4779-9820>

(✉) **Толмачев Иван Владиславович**, ivantolm@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2023;
одобрена после рецензирования 21.04.2023;
принята к публикации 25.05.2023