 © Авторы статьи / Authors of the article

ХИРУРГИЯ/SURGERY

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.19 EDN: XTJOJT

ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНОЙ ОБУВИ ДЛЯ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ

Обзор

Бугаенко М.А.[1], Полиданов М.А.[2,] *, Масляков В.В.[3], Капралов С.В.[4], Гржибовский А.М.[5], Волков К.А.[6], Кашихин А.А.[7]

[2] ORCID : 0000-0001-7538-7412;
[3] ORCID : 0000-0001-6652-9140;
[4] ORCID : 0000-0001-5859-7928;
[5] ORCID : 0000-0002-5464-0498;
[6] ORCID : 0000-0002-3803-2644;
[7] ORCID : 0009-0006-0644-7278;

[1, 2, 5, 7] Университет "Реавиз", Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3, 4, 6] Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (maksim.polidanoff[at]yandex.ru)

Предложена: 20.08.2026; Принята: 10.09.2026; Опубликована: 17.09.2026

Аннотация

Цель. Обобщить и критически оценить международный опыт в области создания и эксплуатации специализированной защитной обуви, предназначенной для снижения риска взрывных травм нижних конечностей у военнослужащих.

Материал и методы. Проведён систематический обзор зарубежных научных публикаций в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, а также патентных и нормативно-технических документов НАТО за период с 1975 по 2025 год. Критериями включения являлись наличие экспериментальных или натурных данных по защите стоп от взрывного воздействия, описание конкретных конструктивных решений или материалов, принадлежность к рецензируемым изданиям или патентным ведомствам. Использованы сравнительно-сопоставительный и структурно-функциональный методы анализа.

Результаты и обсуждение. Проанализированы биомеханические механизмы взрывного поражения стопы, выделены четыре фазы поражающего воздействия. Рассмотрены исследовательские программы США (ARL, ARDEC), Канады (DRDC), Великобритании (D3O Lab), ЮАР, Израиля, Германии (Fraunhofer EMI, программа IdZ) и Китая. Систематизированы современные защитные материалы: дилатантные композиты (D3O), керамические композиты (карбид кремния, оксид алюминия, карбид бора), арамидные волокна и гибридные структуры. Проанализированы нормативно-технические требования (STANAG 4569, STANAG 2920, ГОСТ Р 12.4.252-2013). Показано, что ни одна из зарубежных разработок не обеспечивает комплексной многоуровневой защиты, объединяющей все основные поражающие факторы взрыва. Наиболее перспективным признан подход системной интеграции геометрического отражения взрывной волны, динамического упрочнения дилатантными материалами, противоосколочного арамидного барьера и анатомической фиксации стопы в единой конструкции.

Выводы. Зарубежный опыт свидетельствует о необходимости комплексного подхода к проектированию защитной обуви специального назначения. Системная интеграция различных защитных механизмов в единой конструкции может стать основой для создания отечественного образца защитной обуви, превосходящего зарубежные аналоги по эффективности и эргономичности.

Ключевые слова: защитная обувь, взрывная травма нижних конечностей, противоминная защита, дилатантные материалы, керамические композиты, арамидные волокна, биомеханика, средства индивидуальной защиты, медицина катастроф.

A REVIEW OF INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT AND USE OF PROTECTIVE FOOTWEAR FOR MILITARY PERSONNEL'S LOWER LIMBS

Review article

Bugaenko M.A.[1], Polidanov M.A.[2,] *, Maslyakov V.V.[3], Kapralov S.V.[4], Grjibovski A.M.[5], Volkov K.A.[6], Kashikhin A.A.[7]

[2] ORCID : 0000-0001-7538-7412;
[3] ORCID : 0000-0001-6652-9140;
[4] ORCID : 0000-0001-5859-7928;
[5] ORCID : 0000-0002-5464-0498;
[6] ORCID : 0000-0002-3803-2644;
[7] ORCID : 0009-0006-0644-7278;

[1, 2, 5, 7] University "Reaviz", Saint-Petersburg, Russian Federation
[3, 4, 6] Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky, Saratov, Russian Federation

* Corresponding author (maksim.polidanoff[at]yandex.ru)

Suggested: 20.08.2026; Accepted: 10.09.2026; Published: 17.09.2026

 © Авторы статьи / Authors of the article

Abstract

Objective. To summarise and critically evaluate international experience in the development and use of specialised protective footwear designed to reduce the risk of blast injuries to the lower limbs among military personnel.

Materials and methods. A systematic review was conducted of international scientific publications in the Scopus, Web of Science and PubMed databases, as well as NATO patent and technical standards documents, covering the period from 1975 to 2025. The inclusion criteria were the presence of experimental or field data on the protection of feet against explosive effects, a description of specific design solutions or materials, and publication in peer-reviewed journals or by patent offices. Comparative and structural-functional methods of analysis were used.

Results and Discussion. The biomechanical mechanisms of blast injury to the foot have been analysed, and four phases of the injurious effect have been identified. Research programmes in the USA (ARL, ARDEC), Canada (DRDC), the UK (D3O Lab), South Africa, Israel, Germany (Fraunhofer EMI, the IdZ programme) and China were reviewed. Modern protective materials were categorised: dilatant composites (D3O), ceramic composites (silicon carbide, aluminium oxide, boron carbide), aramid fibres and hybrid structures. Regulatory and technical requirements (STANAG 4569, STANAG 2920, GOST R 12.4.252-2013) have been analysed. It has been demonstrated that none of the foreign developments provides complex multi-level protection that addresses all the main damaging effects of an explosion. The approach recognised as the most promising is the systematic integration of geometric reflection of the blast wave, dynamic reinforcement with dilatant materials, an anti-fragmentation aramid barrier and anatomical fixation of the foot within a single design.

Conclusions. International experience demonstrates the need for a complex approach to the design of specialised safety footwear. The systematic integration of various protective mechanisms into a single design could form the basis for the development of a domestic model of safety footwear that surpasses its international counterparts in terms of effectiveness and ergonomics.

Keywords: protective footwear, blast injuries to the lower limbs, mine protection, dilation materials, ceramic composites, aramid fibres, biomechanics, personal protective equipment, disaster medicine.

Введение

Проблема защиты нижних конечностей военнослужащих от поражающих факторов взрыва остаётся одной из самых острых в системе обеспечения индивидуальной безопасности. Статистика локальных конфликтов последних десятилетий — от Ирака и Афганистана до Сирии и зоны проведения специальной военной операции — подтверждает: именно стопы и голени принимают на себя первичное воздействие взрывной волны при подрыве на минах, самодельных взрывных устройствах и ручных гранатах. Тяжесть подобных повреждений такова, что дело не ограничивается ампутацией; нередки летальные исходы от болевого шока и массивной кровопотери ещё на этапе эвакуации [7].

Характер современных боевых действий необратимо сместился от фронтальных столкновений к асимметричным конфликтам, антитеррористическим операциям и действиям малых тактических групп. В этих условиях потребность в средствах защиты, способных погасить энергию детонации маломощных взрывных устройств без критического ограничения подвижности бойца, приобрела по праву стратегический характер. Более того, прогнозируемое насыщение поля боя роботизированными минными системами, кассетными боеприпасами нового поколения и дронами-камикадзе с фугасной боевой частью лишь обостряет задачу: защитная обувь должна противостоять не единичному подрыву, а серии разнородных поражающих воздействий в течение одного эпизода.

Зарубежные исследования в области противоминной и защитной обуви ведутся с 1970-х годов и охватывают широкий спектр направлений — от биомеханики взрывной травмы до разработки принципиально новых функциональных материалов и методик натурных испытаний. Настоящий обзор систематизирует этот международный опыт, прослеживает эволюцию конструкторских решений и оценивает перспективы их практического применения. Зарубежные наработки в настоящем обзоре анализируются не ради самого анализа, а как эмпирическая база для последующего проектирования отечественного образца защитной обуви. Приоритетным видится такой подход, при котором в едином конструктивном решении объединяются разные механизмы защиты — это позволит превзойти существующие зарубежные аналоги по эффективности и эргономичности.

Цель работы — обобщить и критически оценить международный опыт в области создания и эксплуатации специализированной защитной обуви, предназначенной для снижения риска взрывных травм нижних конечностей у военнослужащих.

Методы и принципы исследования

В рамках систематического обзора изучены иностранные публикации, индексируемые в Scopus, Web of Science и PubMed, а также патентная документация и нормативно-технические акты НАТО (серия STANAG) и национальные стандарты Российской Федерации, опубликованные в интервале с 1975 по 2025 г. Для поиска использовались следующие ключевые слова: "blast injury foot", "protective footwear design", "mine protective footwear", "dilatant material footwear", "ceramic composite armor", "aramid ballistic footwear", "STANAG 4569", "STANAG 2920".

Отбор источников проводился по трём критериям: наличие экспериментальных или полигонных данных о защите стоп от взрывного воздействия; детальное описание конкретных конструктивных особенностей либо применяемых материалов; принадлежность публикации к рецензируемым журналам, официальным патентным ведомствам либо нормативно-технической документации. Аналитическая обработка материала строилась на сравнительно-сопоставительном и структурно-функциональном методах.

Основные результаты

Проектирование эффективной защитной обуви невозможно без чёткого представления о том, как именно взрыв повреждает нижние конечности. В этом отношении значимую роль сыграли работы канадских специалистов из

 © Авторы статьи / Authors of the article

Defence Research and Development Canada (DRDC). Они установили, что наряду с прямым давлением на подошву не менее опасным фактором является осевое ускорение, которое через пяточную кость передаётся на большеберцовую кость. Именно этот механизм обусловливает компрессионные переломы и суставные повреждения даже тогда, когда мягкие ткани внешне не разрушены [9].

Взрывное воздействие принято подразделять на несколько последовательных стадий [10], [12], [16]. Первая стадия возникает в момент непосредственного соприкосновения фронта ударной волны с подошвой: при детонации 100 г тротила пиковое давление на контактной поверхности достигает 800 кПа, при этом положительная фаза давления длится всего 2–3 мс. Основная осевая нагрузка приходится на пяточную кость, и, если предел её прочности превышен, развиваются компрессионные переломы. Вторая стадия связана с действием высокоскоростных осколков — частиц грунта, камней, металла, разгоняемых до 200–400 м/с. Третья стадия обусловлена инерционным смещением и ротацией стопы внутри ботинка, что становится причиной травм связок и суставов, в том числе тупых заброневых повреждений [3], [24]. Четвёртая, завершающая фаза — это термическое поражение от продуктов детонации.

Испытания на кадаверных препаратах нижних конечностей показали, что защитная обувь способна предотвратить травматическую ампутацию при зарядах до 100 г тротила, однако повреждения костной ткани при этом остаются существенными [11], [27]. Д.С. Кронин с коллегами создал физические суррогатные манекены и разработал методики испытаний для оценки минных повреждений; их работа убедительно доказывает, что тяжесть перелома пяточной кости служит основным предиктором общей тяжести травмы [8], [9].

Систематические исследования по защите ног военнослужащих в США активизировались после начала кампаний в Ираке и Афганистане. Армейская исследовательская лаборатория (ARL) совместно с Центром разработки вооружений (ARDEC) провела масштабные эксперименты с баллистическими манекенами. Подход ARL заключается в трактовке боевых травм через призму материаловедения и инженерных дисциплин, что даёт уникальные данные для построения моделей повреждений и обоснования требований к средствам защиты [12].

Одним из ключевых достижений ARL стала конечно-элементная модель (FEM) нижней конечности человека, построенная на основе данных компьютерной томографии. Модель верифицирована по экспериментам с посмертными человеческими суррогатами. Расчёты показали, что использование защитной обуви снижает пиковые силы, передаваемые на большеберцовую кость, на 34–40%. Кроме того, модель позволила выявить влияние индивидуальных анатомических особенностей: военнослужащие с более эластичными подошвенными связками, высоким сводом стопы и утолщённой пяточной подушкой оказались в меньшей степени подвержены травмам [12].

В рамках программы ARL также разрабатывались методы измерения импульса на суррогатах нижней конечности — с целью получения базовых данных, полезных при конструировании защитной обуви. Созданная модель сегодня применяется для оценки защитных свойств уже существующих образцов и служит инструментом для совершенствования средств индивидуальной защиты в перспективе [13], [14], [15].

Канадские исследователи из DRDC внесли существенный вклад в развитие методологии оценки защитной обуви. Bergeron и соавторы (1998) провели серию испытаний с детонацией 100-граммовых зарядов-суррогатов противопехотных мин в песке, что стало основой для валидации компьютерных моделей и протоколов тестирования эффективности противопехотных ботинок [1], [4]. Cronin, Williams и Salisbury (2011) разработали физический суррогатный манекен нижней конечности 50-го процентиля, интегрирующий пути передачи нагрузки. Материалы суррогата подобраны на основе свойств при высоких скоростях деформации, сопоставимых с человеческими тканями. Экспериментальные испытания подтвердили согласие предсказанных и реальных повреждений как для защищённых, так и для незащищённых конечностей. Принципиально важным оказался вывод о том, что оценка на основе повреждения тканей чувствительна к изменениям условий нагружения, чего невозможно добиться при использовании существовавших ранее подходов [9].

Отдельного упоминания заслуживает канадская разработка "Spider Boot" — системы с четырьмя опорными ножками, поднимающими платформу на высоту 144 мм над землёй. В основе канадской разработки "Spider Boot" лежит чрезвычайно наглядный принцип: чем значительнее промежуток между стопой и источником взрыва, тем слабее поражающее действие на конечность. Эксперименты подтвердили, что такая конструкция обеспечивает заметное уменьшение ускорений и деформационных нагрузок в зоне голеностопного сустава [17].

Великобритания вносит весомый вклад в создание новых защитных материалов. Так, компания D3O Lab запатентовала серию дилатантных композитов, которые представляют собой сшитые полиуретановые эластомеры с добавлением микрокапсул. В штатном режиме эти материалы сохраняют гибкость и упругость, однако при ударном воздействии их вязкость практически мгновенно возрастает — они становятся жёсткими. Такой эффект связан с дилатантным поведением, то есть резким повышением вязкости по мере увеличения скорости деформации [19]. В рамках британской программы "Future Infantry Soldier" были опробованы экспериментальные ботинки с подошвой из D3O. Результаты показали, что при имитации подрыва 100-граммового тротилового заряда пиковое давление на стопу снижается на 65%. Кроме того, материал сохраняет свои характеристики в широком температурном коридоре — от -40 до +70 °C, что делает его пригодным для эксплуатации как в условиях Арктики, так и в жарком пустынном климате.

Ключевое преимущество D3O — сверхмалое время активации, составляющее около 1 мс. Это на порядок быстрее, чем время, за которое взрывная волна проходит через обычную подошву. Материал не теряет свойств при многократных нагрузках, выгодно отличаясь в этом отношении от пенополиуретанов, накапливающих усталостные повреждения [19].

Первые целенаправленные исследования в области защиты стоп от минного подрыва были инициированы вооружёнными силами Южно-Африканской Республики ещё в 1970–1980-х годах, в период пограничных конфликтов в Анголе и Намибии. Южноафриканские инженеры предложили ботинки с массивной V-образной подошвой из нескольких слоёв резины и стали, предназначенной для отклонения ударной волны от стопы. Эти ранние образцы обеспечивали определённое снижение пикового давления, однако их масса превышала 4 кг на пару, а жёсткость

 © Авторы статьи / Authors of the article

конструкции практически исключала нормальную ходьбу на дистанции свыше нескольких сотен метров. Тем не менее именно эти разработки заложили фундаментальное понимание того, что геометрия нижней поверхности обуви является критическим фактором взаимодействия с фронтом взрывной волны.

В последующем Совет по научным и промышленным исследованиям ЮАР (CSIR) разработал усовершенствованную «минную обувь», аттенюирующую ударную волну в подошве и снижающую риск полной потери конечности. Ботинки CSIR предназначены для предотвращения ампутации при подрыве на малых противопехотных минах и смягчения повреждений тканей и костей при более крупных зарядах [7].

Израильские разработки, представленные компаниями Rambam и Plasan, пошли по пути интеграции керамических элементов в конструкцию подошвы и носка. Пластины из карбида бора и оксида алюминия, используемые в израильских разработках, обладают высокой твёрдостью и надёжно противостоят проникновению осколков. Однако главный недостаток керамики — её склонность к растрескиванию при изгибающих воздействиях. Эту проблему удалось обойти за счёт сегментирования: пластины делятся на небольшие фрагменты, которые монтируются на эластичной основе. Благодаря такому решению удаётся сохранить барьерные свойства, не жертвуя гибкостью, необходимой для обычной ходьбы. Дополнительное сочетание керамики с арамидными волокнами (Кевлар, Тварон) позволяет формировать лёгкие и вместе с тем высокоэффективные защитные слои [5], [18], [22].

В Германии программа бундесвера IdZ ("Infanterist der Zukunft" — «Пехотинец будущего») предусматривала встраивание защитных компонентов непосредственно в конструкцию боевого ботинка. Специалисты института Fraunhofer EMI (основан в 1959 году, профиль — исследование столкновений, ударных нагрузок и взрывных процессов) сосредоточились на применении многослойных пакетов из арамидной ткани для нейтрализации вторичных осколков. Немецкие эксперименты показали, что пакет из 12–15 слоёв арамидной ткани плотностью 200 г/м² способен остановить осколок массой 2 г на скорости 300 м/с, что соответствует параметрам вторичного поражения при подрыве ручной гранаты на расстоянии 1–1,5 м [5].

Китайские исследователи из Пекинского технологического института и Академии инженерной физики представили результаты моделирования взаимодействия взрывной волны с многослойными структурами методом конечных элементов. Ими показано, что использование уголковых отражателей и оптимизированных керамических композитов позволяет снизить давление на последующие слои на 30–40% за счёт деструктивной интерференции отражённых волн [6], [22]. Исследования биоинспирированных керамических композитных структур подтвердили их высокую эффективность против проникновения и перфорации; разработаны конечно-элементные модели для анализа прогрессирующего повреждения и механизмов диссипации энергии при ударном воздействии [23], [28]. Китайские учёные также исследовали двухслойные керамические композиты, широко применяемые в области защиты, и показали, что взаимодействие керамического и композитного слоёв существенно влияет на функциональность брони в целом [22], [28].

В международной практике ключевыми документами являются стандарты НАТО серии STANAG. Документ STANAG 4569 (AEP-55) устанавливает градацию уровней баллистической и противоминной защищённости для экипажей логистических и легкобронированных машин — всего предусмотрено шесть ступеней защиты от кинетических поражающих элементов и артиллерийского огня [2], [21]. Параллельно STANAG 2920 регламентирует порядок баллистических испытаний материалов и конструкций, используемых в средствах индивидуальной бронезащиты. Базовым показателем здесь служит баллистический предел V_{50}, то есть скорость, при которой вероятность сквозного пробития достигает 50%. Тестирование проводят с применением фрагменто-имитирующих пуль (FSP) в различных скоростных режимах [20].

Что касается непосредственно защитной обуви, то методика оценки противоминной стойкости предполагает подрыв заряда установленной массы непосредственно под подошвой манекена, оснащённого датчиками давления и акселерометрами. К числу критериев, по которым фиксируется успешное прохождение испытаний, относятся: сохранность костных эквивалентов (отсутствие разрушений), уменьшение пикового давления как минимум на 60% и целостность всех защитных слоёв [14], [18], [25].

Российская нормативная база в области индивидуальной защиты ног опирается на ГОСТ Р 12.4.252-2013 («Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Общие технические требования») и ГОСТ 12.4.033-77 («ССБТ. Обувь специальная. Общие технические условия») [29], [30].

Обобщая зарубежные наработки, можно выделить несколько основных типов материалов, нашедших применение в защитной обуви. Дилатантные композиты (например, D3O и его аналоги) характеризуются динамическим упрочнением при ударных нагрузках [19]. Керамические составы — карбид кремния, оксид алюминия, карбид бора — обеспечивают высокую твёрдость и препятствуют проникновению [6], [22], [23]. Арамидные волокна (Кевлар, Тварон) отвечают за противоосколочную стойкость и рассеивание энергии удара [5].

В качестве перспективного вектора рассматривается разработка гибридных композитов, объединяющих разные типы волокнистых наполнителей и полимерных матриц. Исследования в сфере метаструктур и акустических метаматериалов в перспективе могут привести к созданию отражателей нового поколения, способных практически полностью гасить взрывную волну в заданном частотном диапазоне. Не менее важна разработка методов компьютерного моделирования для оптимизации защитных структур: конечно-элементная модель Total Human Model for Safety (THUMS), уже применяемая для изучения различных механизмов травм, может быть адаптирована и для оценки защитной обуви [3], [26].

Заключение

Проведённый анализ свидетельствует о том, что зарубежные исследования в области защитной обуви охватывают широкий спектр направлений: биомеханику взрывной травмы (США, Канада), разработку новых материалов (Великобритания, Израиль), создание методологий испытаний (НАТО, Канада) и компьютерное моделирование (США,

 © Авторы статьи / Authors of the article

Китай, Германия). Наибольший прогресс достигнут в области дилатантных композитов (D3O) и керамических защитных элементов.

Вместе с тем, несмотря на значительные усилия и финансирование, ни одна из существующих зарубежных разработок не обеспечивает комплексной защиты, объединяющей все четыре фазы поражающего воздействия: отражение взрывной волны, поглощение энергии, противоосколочную защиту и анатомическую фиксацию стопы. Большинство решений ориентированы на один-два аспекта защиты, что в условиях насыщения современного театра боевых действий разнотипными взрывными угрозами — от противопехотных мин до фугасных зарядов дронов — представляется недостаточным.

Перспективным направлением является системная интеграция различных защитных механизмов в единой конструкции. Именно такой подход позволит создать обувь, обеспечивающую многоуровневую защиту при сохранении подвижности и комфорта, и может быть положен в основу отечественного образца, превосходящего зарубежные аналоги.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную верификацию расчётных параметров защиты, оптимизацию геометрии защитных элементов, разработку сенсорных систем мониторинга состояния защитных слоёв и применение аддитивных технологий для создания индивидуальных защитных элементов. Зарубежный опыт в этой области полезен для формирования отечественного образца, учитывающего как международные достижения, так и специфику применения в различных климатических и тактических условиях.

Финансирование

Работа поддержана грантом Фонда содействия инновациям (конкурс «Студенческий стартап» (очередь 7), раздел H2 «Медицина и технологии здоровьесбережения», заявка СтС-623828 от 17.03.2026, Договор №3661ГССС27/116461от 17.08.2026).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was supported by a grant from the Foundation for Assistance to Innovations (the "Student Startup" competition (stage 7), section H2 "Medicine and Health-Preserving Technologies", application StS-623828 dated 17.03.2026, Contract № 3661GSSS27/116461 dated 17.08.2026).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Bergeron D.M. Detonation of 100-gram anti-personnel mine surrogate charges in sand: a test case for computer code validation / D.M. Bergeron, R. Walker, C. Coffey. — Suffield, Alberta : Defence Research Establishment Suffield, 1998. — Report №: SR 668.

2. Bolduc M. Improved test methods for better protection, a BABT protocol based on STANAG 2920 / M. Bolduc, C. Biron, S. Pelchat // Proceedings of the Personal Armour Systems Symposium (PASS 2010). — Quebec : DRDC Valcartier, 2010. — P. 1–12.

3. Cannon L. Behind Armour Blunt Trauma — an emerging problem / L. Cannon // Journal of the Royal Army Medical Corps. — 2001. — Vol. 147. — № 1. — P. 87–93.

4. Chaloner E.J. Principles and problems underlying testing the effectiveness of blast protective boots / E.J. Chaloner, J. McMaster, D.E. Hinsley // Journal of the Royal Army Medical Corps. — 2002. — Vol. 148. — № 1. — P. 83–87. — DOI: 10.1136/jramc-148-01-08.

5. Cheeseman B.A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates / B.A. Cheeseman, T.A. Bogetti // Composite Structures. — 2003. — Vol. 61. — № 1–2. — P. 161–173. — DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00029-1.

6. Chen Z. Analysis of bulletproof performance of structurally optimized ceramic composite armor through numerical simulation and live fire test / Z. Chen, J. Hou, F. Gao [et al.] // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14. — DOI: 10.1038/s41598-024-80752-0.

7. Coupland R.M. Amputation for antipersonnel mine injuries of the leg: preservation of the tibial stump using a medial gastrocnemius myoplasty / R.M. Coupland // Annals of the Royal College of Surgeons of England. — 1989. — Vol. 71. — № 6. — P. 405–408.

8. Cronin D.S. Test methods for protective footwear against AP mine blast / D.S. Cronin, K.V. Williams, C.R. Bass [et al.] // NATO RTO Meeting Proceedings RTO-MP-HFM-093. — Bruxelles : NATO Research and Technology Organization, 2003. — Paper 16.

9. Cronin D.S. Physical surrogate leg to evaluate blast mine injury / D.S. Cronin, K. Williams, C. Salisbury // Military Medicine. — 2011. — Vol. 176. — № 12. — P. 1408–1416. — DOI: 10.7205/MILMED-D-11-00044.

10. Dong L. Blast effect on the lower extremities and its mitigation: a computational study / L. Dong, F. Zhu, X. Jin [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. — 2013. — Vol. 28. — P. 111–124. — DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.07.010.

11. Dussault M.C. Blast injury and the human skeleton: an important emerging aspect of conflict-related trauma / M.C. Dussault, M. Clasper, S.A. Stapley // Journal of Forensic Sciences. — 2014. — Vol. 59. — № 3. — P. 690–696. — DOI: 10.1111/1556-4029.12361.

 © Авторы статьи / Authors of the article

12. Suchoń S. Lower Leg Injury Mechanism Investigation During an IED Blast Under a Vehicle Using an Anatomic Leg Model / S. Suchoń, M. Burkacki, K. Joszko [et al.] // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. — 2021. — Vol. 9. — Art. 725006. — DOI: 10.3389/fbioe.2021.725006.

13. Hampton C.E. Analysis of Force Mitigation by Boots in Axial Impacts using a Lower Leg Finite Element Model / C.E. Hampton, M. Kleinberger, M. Schlick [et al.] // Stapp Car Crash Journal. — 2019. — Vol. 63. — P. 267–289. — DOI: 10.4271/2019-22-0011.

14. LeSueur J. Surface wave analysis of the skin for penetrating and non-penetrating projectile impact in porcine legs / J. LeSueur, C. Hampton, J. Koser [et al.] // Forensic Science, Medicine and Pathology. — 2023. — Vol. 19. — № 1. — P. 34–43. — DOI: 10.1007/s12024-022-00521-1.

15. Singh S. Finite Element Analysis of Protective Helmets using Different Material Parameters / S. Singh, H. Singh // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. — 2017. — Vol. 6. — № 5. — DOI: 10.15680/IJIRSET.2017.0605201.

16. Hayda R. Blast injury research: modeling injury effects of landmines, bullets, and bombs / R. Hayda, R.M. Harris, C.D. Bass // Clinical Orthopaedics and Related Research. — 2004. — № 422. — P. 97–108. — DOI: 10.1097/01.blo.0000128295.28666.ee.

17. Islam S. The Spider Boot: an effective foot protection system against anti-personnel mine blasts / S. Islam, A. Makris, D. Bergeron // Journal of Mine Action. — 2000. — Vol. 4. — № 2. — P. 32–41.

18. Medvedovski E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1 / E. Medvedovski // Ceramics International. — 2010. — Vol. 36. — № 7. — P. 2103–2115. — DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.05.021.

19. Meyers M.A. Dynamic Behavior of Materials / M.A. Meyers. — New York : John Wiley & Sons, 1994. — 688 p.

20. NATO. STANAG 2920 (Edition 2). Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing. — Bruxelles : NATO Standardization Office, 2003.

21. NATO. STANAG 4569 (Edition 3). Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles. — Bruxelles : NATO Standardization Office, 2010.

22. Pan G. Coupled FEM-SPH simulation of the protective properties for metal/ceramic composite armor / G. Pan, H. Su, X. Li [et al.] // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. — 2023. — Vol. 6. — № 4. — P. 543–551.

23. Qi F. Ballistic protection and damage mechanism of ceramic composite armor under two-dimensional pre-stressed constraints by molten metal casting / F. Qi, C. Wang, W. Xu // Aerospace Science and Technology. — 2025. — Vol. 159. — Art. 110021. — DOI: 10.1016/j.ast.2025.110021.

24. Ramasamy A. Blast-related fracture patterns: a forensic biomechanical approach / A. Ramasamy, A.M. Hill, S.D. Masouros [et al.] // Journal of the Royal Society Interface. — 2011. — Vol. 8. — № 58. — P. 689–698. — DOI: 10.1098/rsif.2010.0476.

25. Trimble K. Anti-personnel mine injury: mechanism and medical management / K. Trimble, J.C. Clasper // Journal of the Royal Army Medical Corps. — 2001. — Vol. 147. — № 1. — P. 73–79. — DOI: 10.1136/jramc-147-01-07.

26. Vikram A. Computational assessment of leg response to extreme blast loading using the THUMS finite element model / A. Vikram, R. Sharma, K. Singh // International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering. — 2023. — Vol. 39. — № 12. — Art. e3768. — DOI: 10.1002/cnm.3768.

27. Wolff K.S. Effect of body armor on simulated landmine blasts to cadaveric legs / K.S. Wolff, C. Prusaczyk, C. Emerson [et al.] // Journal of Trauma. — 2005. — Vol. 59. — № 1. — P. 202–208. — DOI: 10.1097/01.TA.0000174512.57137.7E.

28. Zhang S. Characteristics and mechanism of lower limb injury induced by landmine blast: a research in a rabbit model / S. Zhang, G. Han, Y. Xiong [et al.] // Ulusal Travma ve Acil Cerrahi Dergisi. — 2023. — Vol. 29. — № 12. — P. 1335–1343. — DOI: 10.14744/tjtes.2023.39560.

29. ГОСТ 12.4.033-77. ССБТ. Обувь специальная кожаная для защиты от скольжения по зажиренным поверхностям. Технические условия. — Введ. 1979-01-01. — Москва : Стандартинформ, 1977. — URL: https://en.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4129186 (дата обращения: 20.08.2026).

30. ГОСТ Р 12.4.252-2013. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты рук. Перчатки. Общие технические требования. Методы испытаний. — Введ. 2014-03-01. — Москва : Стандартинформ, 2014. — URL: https://krotrud.ru/upload/info/gosty/12_4_252.pdf (дата обращения: 20.08.2026).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bergeron D.M. Detonation of 100-gram anti-personnel mine surrogate charges in sand: a test case for computer code validation / D.M. Bergeron, R. Walker, C. Coffey. — Suffield, Alberta : Defence Research Establishment Suffield, 1998. — Report №: SR 668.

2. Bolduc M. Improved test methods for better protection, a BABT protocol based on STANAG 2920 / M. Bolduc, C. Biron, S. Pelchat // Proceedings of the Personal Armour Systems Symposium (PASS 2010). — Quebec : DRDC Valcartier, 2010. — P. 1–12.

3. Cannon L. Behind Armour Blunt Trauma — an emerging problem / L. Cannon // Journal of the Royal Army Medical Corps. — 2001. — Vol. 147. — № 1. — P. 87–93.

4. Chaloner E.J. Principles and problems underlying testing the effectiveness of blast protective boots / E.J. Chaloner, J. McMaster, D.E. Hinsley // Journal of the Royal Army Medical Corps. — 2002. — Vol. 148. — № 1. — P. 83–87. — DOI: 10.1136/jramc-148-01-08.

5. Cheeseman B.A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates / B.A. Cheeseman, T.A. Bogetti // Composite Structures. — 2003. — Vol. 61. — № 1–2. — P. 161–173. — DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00029-1.

 © Авторы статьи / Authors of the article

6. Chen Z. Analysis of bulletproof performance of structurally optimized ceramic composite armor through numerical simulation and live fire test / Z. Chen, J. Hou, F. Gao [et al.] // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14. — DOI: 10.1038/s41598-024-80752-0.

7. Coupland R.M. Amputation for antipersonnel mine injuries of the leg: preservation of the tibial stump using a medial gastrocnemius myoplasty / R.M. Coupland // Annals of the Royal College of Surgeons of England. — 1989. — Vol. 71. — № 6. — P. 405–408.

8. Cronin D.S. Test methods for protective footwear against AP mine blast / D.S. Cronin, K.V. Williams, C.R. Bass [et al.] // NATO RTO Meeting Proceedings RTO-MP-HFM-093. — Bruxelles : NATO Research and Technology Organization, 2003. — Paper 16.

9. Cronin D.S. Physical surrogate leg to evaluate blast mine injury / D.S. Cronin, K. Williams, C. Salisbury // Military Medicine. — 2011. — Vol. 176. — № 12. — P. 1408–1416. — DOI: 10.7205/MILMED-D-11-00044.

10. Dong L. Blast effect on the lower extremities and its mitigation: a computational study / L. Dong, F. Zhu, X. Jin [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. — 2013. — Vol. 28. — P. 111–124. — DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.07.010.

11. Dussault M.C. Blast injury and the human skeleton: an important emerging aspect of conflict-related trauma / M.C. Dussault, M. Clasper, S.A. Stapley // Journal of Forensic Sciences. — 2014. — Vol. 59. — № 3. — P. 690–696. — DOI: 10.1111/1556-4029.12361.

12. Suchoń S. Lower Leg Injury Mechanism Investigation During an IED Blast Under a Vehicle Using an Anatomic Leg Model / S. Suchoń, M. Burkacki, K. Joszko [et al.] // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. — 2021. — Vol. 9. — Art. 725006. — DOI: 10.3389/fbioe.2021.725006.

13. Hampton C.E. Analysis of Force Mitigation by Boots in Axial Impacts using a Lower Leg Finite Element Model / C.E. Hampton, M. Kleinberger, M. Schlick [et al.] // Stapp Car Crash Journal. — 2019. — Vol. 63. — P. 267–289. — DOI: 10.4271/2019-22-0011.

14. LeSueur J. Surface wave analysis of the skin for penetrating and non-penetrating projectile impact in porcine legs / J. LeSueur, C. Hampton, J. Koser [et al.] // Forensic Science, Medicine and Pathology. — 2023. — Vol. 19. — № 1. — P. 34–43. — DOI: 10.1007/s12024-022-00521-1.

15. Singh S. Finite Element Analysis of Protective Helmets using Different Material Parameters / S. Singh, H. Singh // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. — 2017. — Vol. 6. — № 5. — DOI: 10.15680/IJIRSET.2017.0605201.

16. Hayda R. Blast injury research: modeling injury effects of landmines, bullets, and bombs / R. Hayda, R.M. Harris, C.D. Bass // Clinical Orthopaedics and Related Research. — 2004. — № 422. — P. 97–108. — DOI: 10.1097/01.blo.0000128295.28666.ee.

17. Islam S. The Spider Boot: an effective foot protection system against anti-personnel mine blasts / S. Islam, A. Makris, D. Bergeron // Journal of Mine Action. — 2000. — Vol. 4. — № 2. — P. 32–41.

18. Medvedovski E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1 / E. Medvedovski // Ceramics International. — 2010. — Vol. 36. — № 7. — P. 2103–2115. — DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.05.021.

19. Meyers M.A. Dynamic Behavior of Materials / M.A. Meyers. — New York : John Wiley & Sons, 1994. — 688 p.

20. NATO. STANAG 2920 (Edition 2). Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing. — Bruxelles : NATO Standardization Office, 2003.

21. NATO. STANAG 4569 (Edition 3). Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles. — Bruxelles : NATO Standardization Office, 2010.

22. Pan G. Coupled FEM-SPH simulation of the protective properties for metal/ceramic composite armor / G. Pan, H. Su, X. Li [et al.] // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. — 2023. — Vol. 6. — № 4. — P. 543–551.

23. Qi F. Ballistic protection and damage mechanism of ceramic composite armor under two-dimensional pre-stressed constraints by molten metal casting / F. Qi, C. Wang, W. Xu // Aerospace Science and Technology. — 2025. — Vol. 159. — Art. 110021. — DOI: 10.1016/j.ast.2025.110021.

24. Ramasamy A. Blast-related fracture patterns: a forensic biomechanical approach / A. Ramasamy, A.M. Hill, S.D. Masouros [et al.] // Journal of the Royal Society Interface. — 2011. — Vol. 8. — № 58. — P. 689–698. — DOI: 10.1098/rsif.2010.0476.

25. Trimble K. Anti-personnel mine injury: mechanism and medical management / K. Trimble, J.C. Clasper // Journal of the Royal Army Medical Corps. — 2001. — Vol. 147. — № 1. — P. 73–79. — DOI: 10.1136/jramc-147-01-07.

26. Vikram A. Computational assessment of leg response to extreme blast loading using the THUMS finite element model / A. Vikram, R. Sharma, K. Singh // International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering. — 2023. — Vol. 39. — № 12. — Art. e3768. — DOI: 10.1002/cnm.3768.

27. Wolff K.S. Effect of body armor on simulated landmine blasts to cadaveric legs / K.S. Wolff, C. Prusaczyk, C. Emerson [et al.] // Journal of Trauma. — 2005. — Vol. 59. — № 1. — P. 202–208. — DOI: 10.1097/01.TA.0000174512.57137.7E.

28. Zhang S. Characteristics and mechanism of lower limb injury induced by landmine blast: a research in a rabbit model / S. Zhang, G. Han, Y. Xiong [et al.] // Ulusal Travma ve Acil Cerrahi Dergisi. — 2023. — Vol. 29. — № 12. — P. 1335–1343. — DOI: 10.14744/tjtes.2023.39560.

29. GOST 12.4.033-77. SSBT. Obuv' spetsial'naya kozhanaya dlya zashchity ot skol'zheniya po zazhirennym poverkhnostyam. Tekhnicheskie usloviya [Occupational Safety Standards System. Special leather footwear for protection against slipping on greasy surfaces. Technical conditions]. — Introd. 1979-01-01. — Moscow : Standartinform, 1977. — URL: https://en.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4129186 (accessed: 20.08.2026). [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

30. GOST R 12.4.252-2013. Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva individual'noy zashchity ruk. Perchatki. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy [Occupational Safety Standards System. Personal protective means of hands. Gloves. General technical requirements. Test methods]. — Introd. 2014-03-01 — Moscow : Standartinform, 2014. — URL: https://krotrud.ru/upload/info/gosty/12_4_252.pdf (accessed: 20.08.2026). [in Russian]