



СПОРТИВНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.62105/2949-6349-2026-3-3-e202612>

УДК 796.012.1:612.766.1

Цифровая регистрация пространственного распределения контактной нагрузки на ударной поверхности боксёрской перчатки при выполнении бокового удара в дисциплине «удар на силу»

Х. Цуй¹✉, С.С. Горбачев¹, С.С. Аганов²

¹ Российский университет спорта «ГЦОЛИФК», г. Москва, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ cuihdsd@gmail.com

Аннотация

Актуальность. Развитие цифровых измерительных систем в единоборствах делает возможным переход от визуально-экспертной оценки ударного действия к количественной регистрации параметров контакта, силы, скорости и пространственной структуры воздействия. В дисциплине «удар на силу», включённой во Всероссийский реестр видов спорта, остаётся недостаточно разработанным вопрос микроскопического анализа пятна контакта перчатки с измерительным снарядом, что ограничивает объективную оценку качества ударного действия и возможности контроля технической подготовки боксёров.

Цель. Оценить возможность применения разработанной сенсорной системы боксёрской перчатки для регистрации пространственного распределения контактной нагрузки при выполнении бокового удара максимальной интенсивности, определить основные характеристики пятна контакта в группе боксёров и оценить вариабельность регистрируемых показателей.

Методы. Исследование имело наблюдательный инструментальный поперечный дизайн. Пиковая максимальная сила удара регистрировалась комплексом CROCUS (3500 Гц), распределение контактной нагрузки – носимой сенсорной матрицей 8 × 8 (64 канала), интегрированной в перчатку GREEN HILL 12 oz. В анализ включены лучшие боковые удары 32 боксёров в возрасте 20,2 ± 2,3 года. Рассчитывались среднее, стандартное отклонение (SD), 95% доверительные интервалы (ДИ) и коэффициент вариации (CV); CV интерпретировался как показатель межиндивидуальной вариативности, а не тест-ретестовой надёжности.

Результаты. Средняя максимальная сила бокового удара составила 2975,5 Н (SD=486,2 Н; 95% ДИ: 2802,3–3148,7 Н; CV=16,3%), средняя суммарная контактная нагрузка сенсорной матрицы – 683,6 Н (SD=118,6 Н; 95% ДИ: 640,8–726,3 Н; CV=17,4%). На групповой нормированной карте максимальная нагрузка располагалась в центрально-правой области; CoP находился в координатах $X = 4,78$, $Y = 4,52$, центральная зона 4 × 4 включала 52,7% суммарной нагрузки. CV 11,6–17,4% отражали умеренную межиндивидуальную вариативность и не использовались как доказательство воспроизводимости измерительной процедуры.



Выводы. Сенсорная перчатка может использоваться как дополнительный цифровой инструмент для пространственной характеристики контакта перчатки со снарядом и технического анализа удара. Суммарная нагрузка матрицы не должна заменять высокочастотное измерение пиковой силы CROCUS или интерпретироваться как механический коэффициент передачи силы; для оценки тест-ретестовой надёжности необходимы повторные измерения с расчётом ICC/SEM.

Ключевые слова: удар на силу, бокс, боковой удар, силомер, боксёрская перчатка, сенсорная матрица, пьезорезистивный датчик, центр давления, контактная нагрузка, спортивная инженерия

SPORTS ENGINEERING

Research article

<https://doi.org/10.62105/2949-6349-2026-3-3-e202612>

UDC 796.012.1:612.766.1

Digital registration of the spatial distribution of contact load on the striking surface of a boxing glove during hook punches in the “strike force” discipline

H. Cui¹✉, S.S. Gorbachev¹, S.S. Aganov²

¹ Russian University of Sport “GTSOLIFK”, Moscow, Russian Federation

² Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

✉ cuihdsd@gmail.com

Abstract

Relevance. The development of digital measuring systems in martial arts allows us to move away from visual expert assessments of impact towards quantitative registration of contact parameters, such as force, speed, and spatial structure. In the field of “impact force”, which is included in the All-Russian Sports Register, there is a lack of development in microscopic analysis of the contact area between a glove and a measuring device, which limits objective assessment of impact quality and monitoring of boxer’s technical training.

Aim. To evaluate the potential of using the developed boxing glove sensor system to record the spatial distribution of contact force during a side impact with maximum intensity, and to determine the main characteristics of the contact area in a group of boxers. Additionally, we aim to assess the variability of recorded indicators.

Methods. The study used an observational, instrumental, cross-sectional design. The maximum impact force peak was recorded using the CROCUS complex (3500 Hz), and the contact load distribution was measured using an 8 × 8 wearable sensor matrix with 64 channels integrated into the GREEN HILL glove (12 oz). The analysis included the best side punches from 32 boxers aged 20.2 ± 2.3 years. Mean, standard deviation (SD), 95% confidence intervals (CI), and coefficients of variation (CV) were calculated. CV was interpreted as an indicator of inter-individual variability rather than test-retest reliability.



Results. The average maximum force during the side impact was 2975.5 N (SD=486.2 N; 95% CI: 2802.3–3148.7 N; CV=16.3%). The average total load on the sensor array was 683.6 N (SD=118.6 N; 95% CI: 640.8–726.3 N; CV=17.4%). On the normalized map of the group, the highest load was located in the center-right area. The center of pressure (CoP) was located at coordinates $X = 4.78$, $Y = 4.52$, and the central zone of 4×4 covered 52.7% of the total load, with CV ranging from 11.6% to 17.4%. These results indicate moderate inter-individual variability, and they are not considered evidence of the reproducibility of the measurement procedure.

Conclusions. The sensor glove can be used as an additional digital tool for spatial characterization of glove-projectile contact and technical impact analysis. However, the total load of the matrix should not replace high-frequency measurements of the CROCUS peak force, nor be interpreted as a mechanical force transfer coefficient. Repeated measurements with calculation of ICC/SEM are necessary to assess test-retest reliability.

Keywords: strike force, boxing, hook punch, dynamometer, boxing glove, sensor matrix, piezoresistive sensor, center of pressure, contact load, sports engineering

Введение

Развитие цифровых измерительных систем в единоборствах делает возможным переход от визуально-экспертной оценки ударного действия к количественной регистрации параметров контакта, силы, скорости и пространственной структуры воздействия. Особую актуальность этот подход приобретает в дисциплине «удар на силу», которая была включена во Всероссийский реестр видов спорта как спортивная дисциплина вида спорта «бокс» приказом Министерства спорта Российской Федерации № 566 от 11.06.2024.¹ В нормативном описании соревнований сила удара рассматривается как показатель веса удара рукой, определяемый с помощью силомера.² Поэтому точность, воспроизводимость и интерпретируемость цифровых измерений становятся не только научной, но и организационно-соревновательной задачей.

В соревновательном формате дисциплины «удар на силу» спортсмен выполняет одиночный удар по сертифицированному силомеру. В регламентах соревнований описаны условия допуска, использование боксёрских перчаток, применение силомера, запрет разбега или прыжка перед ударом, наличие пробной попытки и трёх зачётных попыток, а итоговым результатом является максимальное значение из зачётных ударов.³ Такая процедура позволяет стандартизировать внешний результат – пиковую силу ударного действия. Однако один интегральный показатель силы не раскрывает, какой частью перчатки был нанесён удар, насколько концентрированным было пятно контакта и где находился центр приложения результирующей нагрузки.

¹Приказ Министерства спорта Российской Федерации от 11.06.2024 № 566 «О признании и включении во Всероссийский реестр видов спорта спортивных дисциплин и внесении изменений во Всероссийский реестр видов спорта». Зарегистрировано Минюстом России 09.07.2024, № 78781. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202407090009>

²Приказ Минспорта России от 04.12.2025 № 1076 «Об утверждении федерального стандарта спортивной подготовки по виду спорта «бокс»». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202601210018>

³Федерация бокса России. Положение о Чемпионате Южного федерального округа России по виду спорта «бокс» (дисциплина – удар на силу). 2025. URL: <https://sshor1.gosuslugi.ru/sorevnovaniya/polozhenie-o-chempionate-yuzhnogo-federalnogo-okruga-rossii-po-vidu-sporta-box-distsiplina-udar-na-silu.html>



Для бокса характерна сложная координационная структура ударного действия, в которой результат зависит от согласования движений нижних конечностей, туловища, плечевого пояса и ударной руки. В обзорах подчёркивается, что спортивная результативность в боксе связана не только с уровнем физической подготовленности, но и с биомеханической эффективностью передачи импульса на цель [1]. В ранних исследованиях для оценки ударной силы применялись специальные динамометрические устройства [2], а также измерялись повреждающие характеристики удара и кинематика воздействия на голову или снаряд [3, 4]. В профессиональном боксе предпринимались попытки прямой регистрации силы ударов в условиях поединка [5].

Наряду с силой удара, в литературе рассматриваются скорость руки, кинематика верхней конечности, участие нижних конечностей, ротация туловища и различия между прямыми, боковыми ударами и ударами снизу [6, 7, 8, 9, 10]. При этом боковой удар имеет выраженную ротационную составляющую и может формировать более асимметричное пятно контакта на ударной поверхности перчатки. Поэтому для анализа качества бокового удара важно регистрировать не только итоговый показатель силомера, но и распределение нагрузки на поверхности перчатки.

В последние годы в боксе стали развиваться системы мониторинга, способные регистрировать ударную силу, скорость, момент контакта, центр давления и распределение силы на поверхности кулака или перчатки [11, 12, 13]. Эти решения согласуются с общим развитием носимой электроники, гибких сенсоров и микросенсорных систем для анализа движений и нагрузок в спорте [14, 15, 16, 17, 18, 19]. Кроме того, цифровая структура данных открывает возможности для последующего применения алгоритмов машинного обучения при автоматическом распознавании ударов и оценке техники [20].

Несмотря на это, в практических условиях дисциплины «удар на силу» остаётся недостаточно разработанным вопрос микроскопического анализа пятна контакта перчатки с измерительным снарядом. Стандартный силомер объективно фиксирует пиковый результат, но не показывает пространственное распределение контакта. Это ограничивает возможности тренера при объяснении спортсмену причин высокого или низкого результата, а также затрудняет инженерную оценку перчаток и измерительных снарядов. Поэтому разработка носимого датчика давления, интегрированного в перчатку и совместимого с соревновательной процедурой, представляет научный и практический интерес.

Цель исследования – оценить возможность применения разработанной сенсорной системы боксёрской перчатки для регистрации пространственного распределения контактной нагрузки при выполнении бокового удара максимальной интенсивности и определить основные характеристики пятна контакта в группе боксёров, специализирующихся на ударных действиях.

Задачи исследования: 1) описать инструментальную схему совместной регистрации пиковой силы удара и распределения нагрузки на поверхности перчатки; 2) определить средние показатели максимальной силы и суммарной контактной нагрузки при боковом ударе; 3) рассчитать локализацию максимальной нагрузки и положение центра давления; 4) оценить прикладную значимость метода для цифровой аналитики дисциплины «удар на силу».

Методика и организация исследования

Дизайн и база исследования. Исследование имело наблюдательный инструментальный поперечный дизайн без контрольной группы и без экспериментального вмешательства.



тельства. Тестирование проводилось в боксёрском зале Российского университета спорта «ГЦОЛИФК». Спортсмены выполняли стандартизированное спортивное задание максимальной интенсивности.

Участники исследования. В анализ включены 32 боксёра, для которых лучшая зачётная попытка была выполнена боковым ударом. Средний возраст составил $20,2 \pm 2,3$ года. К участию допускались спортсмены без острых травм верхних конечностей и без медицинских противопоказаний к выполнению ударных действий максимальной интенсивности. Для всех 32 участников получено добровольное информированное согласие.

Характеристики выборки. Средняя масса тела спортсменов составила $73,5 \pm 9,2$ кг, средний рост – $178,0 \pm 5,6$ см. В выборку вошли 2 мастера спорта, 6 кандидатов в мастера спорта и 12 спортсменов I спортивного разряда; остальные 12 участников не имели официального спортивного разряда и/или относились к любительскому уровню. В ходе тестирования 28 спортсменов использовали левостороннюю (ортодоксальную) стойку и выполняли удар доминантной правой рукой; остальные 4 спортсмена использовали правостороннюю стойку и выполняли удар доминантной левой рукой.

Регистрация пиковой максимальной силы удара. Для регистрации пиковой максимальной силы удара применялся аппаратно-программный комплекс для измерения силы удара – силомер второго поколения производства ООО «CROCUS» (Россия). Данный комплекс сертифицирован Федерацией бокса России и используется в качестве специализированного измерительного снаряда для спортивной дисциплины «удар на силу». Конструктивно силомер представляет собой многослойный подвесной боксёрский мешок, закреплённый на регулируемой металлической стойке. Высота измерительного снаряда составляет 1250 мм, диаметр – 450 мм, масса – 60 кг. Конструкция мешка включает внешнее покрытие из натуральной кожи, амортизирующий пенополиуретановый слой для виброгашения, а также внутренний утяжеляющий сердечник с интегрированной металлической трубой диаметром 40 мм.

Внутри измерительного снаряда размещена система датчиков, обеспечивающая регистрацию механического воздействия при выполнении ударного действия. На расстоянии 200 мм от верхнего и нижнего краёв внутренней металлической трубы расположены две группы трёхосевых акселерометров с рабочим диапазоном измерения от 0 до 3,5 g. Такое размещение датчиков позволяет фиксировать реакцию снаряда на ударное воздействие и использовать полученные сигналы для расчёта величины силы удара.

Аналоговый сигнал с датчиков поступает в электронный блок, расположенный в верхней части измерительного комплекса. Оцифровка сигнала осуществляется с использованием 16-канального 12-битного аналого-цифрового преобразователя. Пропускная способность системы составляет 200 кбит/с, чувствительность – 1 мВ, максимальная амплитуда входного сигнала – 3 В при эквиваленте ударного воздействия 1500 кг. Регистрация данных осуществляется с частотой дискретизации 3500 Гц. Для анализа отдельного ударного действия формируется временное окно продолжительностью 240 мс, в пределах которого программное обеспечение выделяет и обрабатывает сигнал, соответствующий удару. При максимальной длительности контакта до 0,5 с массив данных может включать до 1750 измерительных точек. Высокая частота регистрации позволяет анализировать кратковременный ударный импульс и фиксировать пиковое значение силы удара.

Программный модуль комплекса автоматически адаптирует расчётные коэффициенты с учётом биомеханического типа удара, в том числе скоростно-хлёсткого и силового-толчкового вариантов. Комплекс поддерживает мультирежимную систему измерений: одиночные удары регистрируются в диапазоне 50–1500 кг, серии ударов – в диапазоне



20–600 кг, а максимальный рабочий диапазон измерений составляет от 5 до 2000 кг, что соответствует приблизительно 49–19613 Н. В настоящем исследовании основным анализируемым показателем являлась пиковая максимальная сила одиночного ударного действия. Значения, полученные в килограммах-силах, при необходимости переводились в ньютоны с использованием коэффициента 9,80665 Н на 1 кгс.

Регистрация распределения контактной нагрузки на ударной поверхности перчатки. Для изучения пространственной структуры контакта перчатки с измерительным снарядами использовалась специализированная носимая сенсорная система, интегрированная в боксёрскую перчатку. Основным измерительным элементом являлся гибкий плёночный датчик давления пьезорезистивного типа производства ROUXI. Принцип его работы основан на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента при приложении внешней нагрузки: при увеличении давления сопротивление уменьшается, а электропроводность возрастает. В рамках программного обеспечения измеряемая величина обозначалась как давление; с физической точки зрения в настоящей статье она интерпретируется как контактная нагрузка или эквивалентная нормальная сила, выраженная в ньютонах.

Датчик имел матричную структуру 8×8 , образующую 64 независимых чувствительных элемента. Общий размер сенсорной матрицы составлял 108×108 мм, размер активной зоны – $97,5 \times 97,5$ мм. Толщина датчика составляла менее 0,3 мм, что позволяло интегрировать его в перчатку без существенного изменения её формы и без выраженного ограничения естественной биомеханики ударного движения. Сенсорная система была интегрирована в боксёрскую перчатку GREEN HILL массой 12 oz (340,194 г), сертифицированную Федерацией бокса России. Датчик размещался в области ударной поверхности перчатки так, чтобы его чувствительная зона соответствовала расположению основных ударных суставов кулака.

Диапазон измерения каждого чувствительного элемента составлял 0–300 Н. Перед началом исследования проводилась калибровка сенсорной системы с использованием эталонных нагрузок на уровнях 10%, 50% и 90% от полного диапазона измерений. Программное обеспечение содержало функцию аппроксимации калибровочных данных, позволяющую преобразовывать электрический сигнал датчика в значение контактной нагрузки. После калибровки коэффициент детерминации составил $R^2=0,998$. Показатель гистерезиса датчиков не превышал 6%, а дрейф составлял менее 8%.

Отдельная методическая валидация этой же 64-канальной сенсорной системы была выполнена ранее в стандартной 12-унциевой перчатке с сопоставлением с сертифицированным силомером CROCUS. В серии из 30 акцентированных ударов (по 10 прямых, боковых и ударов снизу) у квалифицированного боксёра была выявлена высокая линейная связь между системами (Pearson $r=0,911$; $p<0,001$). Анализ Бланда–Альтмана показал систематическое отрицательное смещение показаний перчатки (Bias=–2185,0 Н; 95% LoA: –3975,4...–394,6 Н). После линейной коррекции средняя относительная ошибка снижалась с 75,7% до 12,1%, а нормализованная RMSE – до 17,48%. Эти данные рассматриваются в настоящей работе как отдельная валидация измерительной характеристики устройства и не включены в статистику выборки 32 боксёров.

Система регистрировала относительное изменение сопротивления пьезорезистивных сенсоров через опорный резистор при питающем напряжении 3,3 В. Сигналы с 64 каналов передавались на миниатюрный модуль сбора данных через плоские гибкие шлейфы. Плата сбора данных имела размеры 50×32 мм и размещалась в зоне манжеты перчатки, что минимизировало влияние аппаратной части на подвижность лучезапястного сустава.



Модуль был оснащён интерфейсом Type-C, обеспечивающим питание системы и передачу данных на персональный компьютер. Обмен данными осуществлялся по последовательному интерфейсу USB-TTL со скоростью 115200 бит/с.

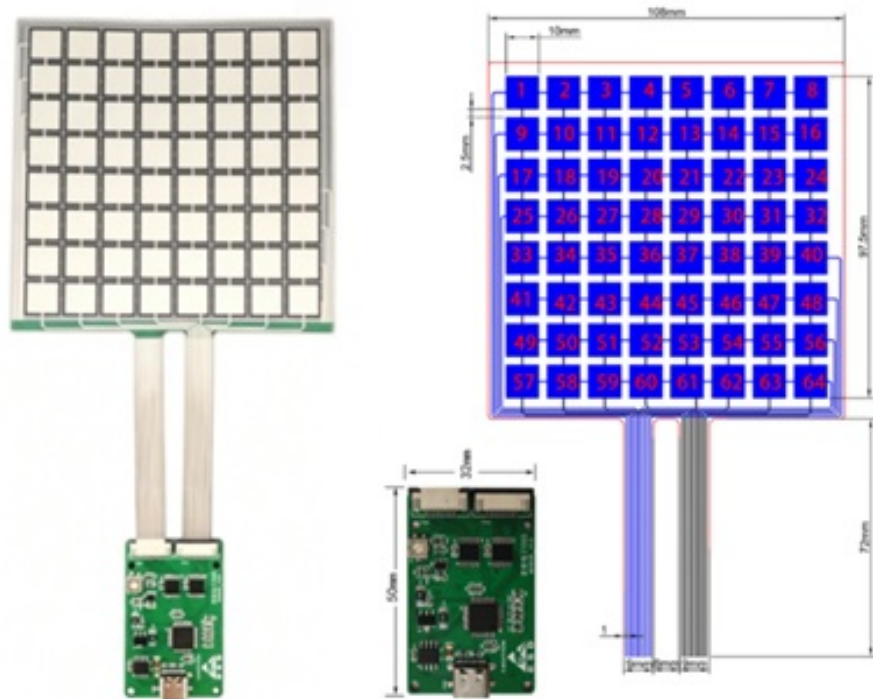


Рис. 1: Внешний вид и конструктивные размеры 64-канальной гибкой пьезорезистивной сенсорной матрицы и модуля сбора данных
Fig. 1: External view and dimensions of the 64-channel flexible piezoresistive sensor matrix and data acquisition module

Таблица 1: Инструментальные средства исследования
Table 1: Instrumentation of the study

Компонент	Основные характеристики	Роль в исследовании
Силомер CROCUS	Подвесной измерительный снаряд; частота регистрации 3500 Гц; рабочий диапазон до 2000 кг; программная обработка ударного импульса	Регистрация пиковой максимальной силы одиночного удара
Сенсорная перчатка	Перчатка GREEN HILL 12 oz; матрица ROUXI 8×8; активная зона 97,5×97,5 мм; 64 канала; диапазон элемента 0–300 Н	Регистрация распределения контактной нагрузки на ударной поверхности перчатки
Модуль сбора данных	Плата 50×32 мм; питание 3,3 В; USB Type-C; интерфейс USB-TTL 115200 бит/с; опрос 10 Гц	Передача 64-канального массива данных на персональный компьютер



Внешний вид гибкой пьезорезистивной сенсорной матрицы, конструктивные размеры и расположение 64 чувствительных элементов представлены на рис. 1. Как отмечалось выше, матрица имела конфигурацию 8×8 и включала 64 независимых чувствительных элемента; общий размер матрицы составлял 108×108 мм, размер активной зоны – $97,5 \times 97,5$ мм, что позволяло перекрывать основную ударную поверхность кулака. Инструментальные средства исследования представлены в таблице 1.

Конструкция и интеграция сенсорной перчатки. Сенсорная матрица размещалась во фронтальной части боксёрской перчатки GREEN HILL 12 oz и перекрывала основную контактную зону ударной поверхности. Ориентация матрицы выполнялась таким образом, чтобы её чувствительная область соответствовала расположению основных пястно-фаланговых суставов кулака. Полученные сигналы с 64 каналов передавались через гибкие шлейфы на миниатюрный модуль сбора данных, размещённый в области манжеты перчатки. Такое расположение минимизировало влияние аппаратной части системы на подвижность лучезапястного сустава. Передача данных на персональный компьютер осуществлялась через интерфейс USB Type-C. Общая конструкция сенсорной перчатки и схема расположения основных элементов системы показаны на рис. 2.



Рис. 2: Общая конструкция сенсорной боксёрской перчатки: расположение матрицы 8×8 на ударной поверхности, модуля сбора данных в области манжеты и системы передачи данных на персональный компьютер

Fig. 2: General configuration of the sensor-equipped boxing glove: position of the 8×8 sensor matrix on the striking surface, data acquisition module at the cuff, and data transmission system

Частота опроса сенсорной матрицы составляла 10 Гц (период 100 мс). Система использовалась не для реконструкции полной временной кривой удара, а для пространственной характеристики зарегистрированного пикового кадра. Поскольку типичная длительность контакта составляет порядка 20–40 мс, интервал дискретизации матрицы в 2,5–5 раз длиннее самого контакта.

Протокол тестирования. Участники выполняли боковой удар максимальной интенсивности по измерительному снаряду. Процедура тестирования ориентировалась на соревновательные правила дисциплины «удар на силу»: после разминки и ознакомительной попытки спортсмен выполнял серию зачётных ударов, из которых для дальнейшего анализа



выбирался наилучший результат, соответствующий абсолютному максимуму силы по данным силомера. В настоящем разделе анализировались данные 32 спортсменов, для которых лучшая попытка была выполнена боковым ударом.

Синхронизация данных выполнялась по моменту выполнения ударного действия. Для силомера CROCUS фиксировалось пиковое значение максимальной силы. Для сенсорной перчатки из массива 64 каналов выделялся пиковый кадр – кадр с максимальной суммой значений всех чувствительных элементов. Данный кадр проецировался на двумерную систему координат X–Y, где X соответствовала столбцам матрицы, Y – строкам матрицы. На основе координат и величин контактной нагрузки рассчитывалось положение центра давления (Center of Pressure, CoP), отражающее условную точку приложения результирующей контактной нагрузки в момент удара [11].

Синхронизация. Аппаратный триггер между CROCUS и сенсорной матрицей отсутствовал. Синхронизация выполнялась программно по событию удара: стартовой меткой служило резкое возрастание сигнала CROCUS, соответствующее началу контакта, после чего данные матрицы сопоставлялись по абсолютной временной шкале регистрации. При периоде опроса матрицы 100 мс временная квантованность ближайшего кадра относительно истинного события в идеальном случае составляет приблизительно ± 50 мс; эта оценка отражает только ограничение дискретизации. Полная ошибка синхронизации, включающая программные и коммуникационные задержки, отдельно не измерялась и могла быть больше. Поэтому система не использовалась для реконструкции миллисекундного временного профиля удара.

Обработка данных. Для пикового кадра рассчитывались суммарная контактная нагрузка $F_{sum} = \sum P_{ij}$, максимальное значение отдельного элемента, координаты максимума и центр давления (CoP). Дополнительно определялись доли центральной зоны 4×4 и ядра 2×2 , а также описательные суммы правой/левой и верхней/нижней половин матрицы. Для рис. 3 использовалась групповая нормированная карта. Поскольку индивидуальные парные значения нагрузок половин матрицы в представленном аналитическом наборе не были доступны для повторного анализа, формальные парные тесты асимметрии (t-тест/Уилкоксона) не выполнялись; соответствующие результаты в переработанной версии трактуются только как описательные характеристики агрегированной карты.

Результаты

Основные результаты регистрации бокового удара представлены в таблице 2. По данным CROCUS, средняя максимальная сила бокового удара у 32 спортсменов составила 2975,5 Н. Средняя суммарная контактная нагрузка матрицы 8×8 в пиковом кадре лучшей попытки составила 683,6 Н. Отношение матричной суммы к показателю силомера составило 23,0%. Этот показатель является только сравнительным описательным индексом и не представляет собой механический коэффициент передачи силы, поскольку системы регистрируют разные физические проявления удара и имеют существенно различающуюся временную дискретизацию.

Для максимальной силы SD составил 486,2 Н (95% ДИ: 2802,3–3148,7 Н; CV=16,3%), для суммарной контактной нагрузки – 118,6 Н (95% ДИ: 640,8–726,3 Н; CV=17,4%), для CoP_X SD=0,61 (CV=12,8%), для CoP_Y SD=0,58 (CV=12,8%), для доли центральной зоны SD=6,12 процентного пункта (CV=11,6%). Эти показатели характеризуют межиндивидуальную вариативность 32 лучших попыток и не являются показателями тест-ретестовой воспроизводимости метода.



Таблица 2: Основные результаты регистрации бокового удара
Table 2: Main results of the hook punch registration

Показатель	Значение	Интерпретация
Количество спортсменов	32	Лучшие попытки, выполненные боковым ударом
Возраст	20,2±2,3 года	Среднее ± SD
Средняя максимальная сила по силомеру	2975,5 Н; SD=486,2 Н; CV=16,3%	Интегральный высокочастотный результат
Средняя суммарная контактная нагрузка матрицы	683,6 Н; SD=118,6 Н; CV=17,4%	Сумма 64 элементов зарегистрированного пикового кадра
Отношение матрицы к силомеру	23,0%	Описательный индекс; не коэффициент передачи силы
Центр давления	X=4,78; Y=4,52	Групповое среднее положение CoP
Максимально нагруженный элемент на агрегированной карте	M29; 35,6 Н	Значение групповой нормированной карты, а не индивидуальный пик
Центральная зона 4×4	360,4 Н; 52,7%	Описательная концентрация нагрузки в центральной области матрицы

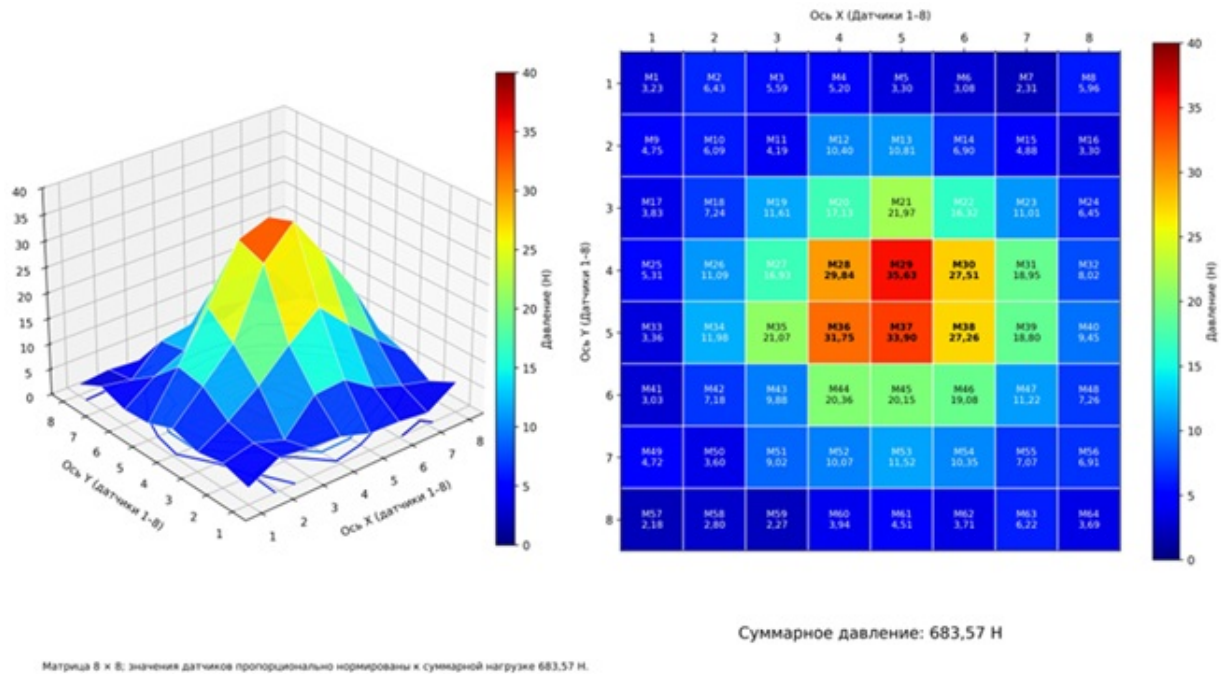


Рис. 3: Пространственное распределение контактной нагрузки на ударной поверхности боксёрской перчатки при выполнении бокового удара. Суммарная контактная нагрузка пикового кадра – 683,6 Н
Fig. 3: Spatial distribution of contact load on the striking surface of a boxing glove during a hook punch. Total contact load of the peak frame is 683.6 N



Для визуализации значения 64 элементов были пропорционально нормированы к групповому среднему значению суммарной нагрузки 683,6 Н. Поэтому значения отдельных ячеек на рис. 3 характеризуют агрегированную групповую карту и не являются пиковыми значениями одного конкретного спортсмена.

На агрегированной карте наиболее нагруженной была зона М28–М30 и М36–М38; максимальное значение отмечено в М29 (35,6 Н). Шесть наиболее нагруженных элементов суммарно составляли 185,9 Н, или 27,2% групповой нормированной нагрузки. Значение М29=35,6 Н относится именно к нормированной групповой карте, а не к индивидуальному пику отдельного боксёра.

Центр давления агрегированной карты находился в координатах $X=4,78$ и $Y=4,52$. Правая половина карты содержала 387,5 Н (56,7%), левая – 296,1 Н (43,3%); верхняя – 335,3 Н (49,1%), нижняя – 348,3 Н (51,0%). Эти соотношения приводятся как описательные характеристики групповой нормированной карты. На основании агрегированных значений нельзя делать вывод о статистически устойчивой асимметрии у спортсменов; для такого вывода необходимы индивидуальные парные данные по 32 участникам.

Центральная зона 4×4 (строки 3–6, столбцы 3–6) аккумулировала 360,4 Н, или 52,7% суммарной нагрузки; центральное ядро 2×2 – 131,1 Н, или 19,2%. Эти показатели описывают концентрацию группового пятна контакта в центральной области матрицы.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что совместное применение силомера и сенсорной перчатки позволяет расширить содержание инструментального тестирования в дисциплине «удар на силу». Силомер CROCUS предоставляет основной соревновательный результат – пиковую максимальную силу удара, тогда как матрица 8×8 описывает микроструктуру контакта. Такое разделение особенно важно для бокового удара, поскольку его эффективность зависит не только от общей силы, но и от ориентации кисти, положения ударных суставов, траектории ротации туловища и качества контакта перчатки со снарядом.

Средняя максимальная сила 2975,5 Н находится в диапазоне значений, сопоставимых с ранее опубликованными исследованиями ударной силы в боксе и единоборствах, где в зависимости от уровня спортсменов, типа удара, методики измерения и массы тела фиксировались существенно различающиеся показатели [2, 3, 4, 5, 8]. При этом прямое сравнение абсолютных значений между исследованиями требует осторожности, поскольку конструкция мишени, тип силового датчика, способ крепления снаряда, наличие или отсутствие движения цели и алгоритмы обработки сигнала могут существенно влиять на результат.

Соотношение 23,0% между суммарной нагрузкой матрицы и показателем CROCUS не следует интерпретировать как механический коэффициент передачи силы. Оно соответствует приблизительно 77,0% относительному расхождению групповых средних. Причины носят совокупный характер: (1) матрица опрашивается каждые 100 мс, тогда как контакт длится примерно 20–40 мс, поэтому зарегистрированный кадр может не совпасть с истинным кратковременным максимумом; (2) активная зона $97,5 \times 97,5$ мм охватывает основную, но не обязательно всю деформируемую контактную поверхность; (3) CROCUS регистрирует реакцию измерительного снаряда, а матрица – локальную нормальную нагрузку на стороне перчатки; (4) материал 12-оз перчатки демпфирует и перераспределяет нагрузку; (5) статическая калибровка не полностью воспроизводит динамические условия



удара. Текущий дизайн не позволяет количественно разделить вклад каждого из этих факторов.

Отдельная динамическая валидация той же системы даёт дополнительное количественное объяснение этого расхождения. В валидационной серии исходная средняя относительная ошибка сенсорной перчатки относительно CROCUS составляла 75,7%, что по порядку величины близко к наблюдаемому в настоящей выборке относительному расхождению групповых средних (77,0%). При этом связь между системами была сильной ($r=0,911$; $p<0,001$), а после линейной коррекции средняя относительная ошибка снижалась до 12,1%. Следовательно, низкое абсолютное отношение матрица/CROCUS скорее отражает систематическое масштабное затухание совокупного происхождения, чем случайную несостоятельность сенсорной системы. Вместе с тем отдельная валидация не позволяет ретроспективно разложить 77,0% расхождения на доли, обусловленные дискретизацией, площадью чувствительной зоны, демпфированием и различием физических величин.

Регистрация контактной нагрузки матрицей перчатки дополняет классические данные о силе удара. В отличие от силомера, который оценивает реакцию снаряда на ударное воздействие, сенсорная перчатка описывает распределение локальной нормальной нагрузки на стороне спортсмена. Подобный подход соответствует современным направлениям анализа CoP и распределения силы в боксе, где особое значение имеет не только величина удара, но и положение результирующей нагрузки на поверхности кулака или перчатки [11, 12].

Сравнение с опубликованными аналогами показывает место предлагаемой системы среди мировых решений. Menzel и Potthast [11, 12] разработали систему мониторинга боксёрской перчатки, регистрирующую перемещение центра давления на кулаке; однако их решение основано на ограниченном наборе отдельных датчиков, тогда как в настоящей работе используется матрица 8×8 из 64 независимых чувствительных элементов, обеспечивающая более детальное пространственное разрешение карты контакта. Jovanovski и Stappenbelt [13] представили невстраиваемый пьезорезистивный датчик для измерения силы удара, размещаемый внутри перчатки, но не охватывающий всю ударную поверхность. Преимуществом предлагаемого метода является интеграция матрицы именно в сертифицированную соревновательную перчатку GREEN HILL 12 oz и одновременная работа с сертифицированным силомером CROCUS, что позволяет сопоставлять локальную картину контакта с интегральным соревновательным результатом. К ограничениям следует отнести меньшую частоту опроса (10 Гц) по сравнению с отдельными коммерческими решениями, ориентированными на анализ быстропротекающих процессов, а также необходимость дополнительной калибровки при смене модели перчатки или типа удара. Выбор пьезорезистивного датчика согласуется с данными обзоров по калибровке и применению тактильных матриц в ударных условиях, подтверждающих устойчивость данного типа сенсоров к механическим нагрузкам [14, 15, 16].

В отличие от высокочастотного силомера, сенсорная перчатка позволяет характеризовать положение результирующей нагрузки и форму пятна контакта, что соответствует современным подходам к анализу CoP и распределения силы [11, 12]. Однако групповое смещение CoP вправо в настоящей работе следует рассматривать как описательную особенность агрегированной карты. Без индивидуального инференциального сравнения правой и левой половин нельзя утверждать, что выявленная асимметрия является статистически устойчивой для выборки.

Практическая ценность метода заключается в получении дополнительного пространственного профиля контакта для технической обратной связи и инженерной оценки



экипировки [21]. Пороговое значение отклонения CoP «более 0,5», присутствовавшее в предыдущей версии, удалено, поскольку в настоящем исследовании не проводилась валидация диагностического порога. Такие пороги должны определяться на повторных измерениях с оценкой естественной вариабельности, ICC/SEM и, при необходимости, анализом чувствительности/специфичности.

Важным методическим ограничением является различие частот регистрации двух систем. Силомер регистрировал ударный импульс с частотой 3500 Гц, что позволяет анализировать кратковременную динамику контакта. Сенсорная матрица опрашивалась с частотой 10 Гц, поэтому не предназначалась для реконструкции полной временной кривой силы удара. Её назначение – пространственная оценка пикового кадра. Следовательно, суммарная нагрузка матрицы не должна заменять показатель силомера и не должна использоваться как единственный критерий силы удара.

Следует количественно оценить влияние дискретизации на получаемые результаты. Поскольку матрица опрашивается каждые 100 мс, а длительность контакта перчатки со снарядом составляет 30 мс, вероятность точного совпадения зарегистрированного кадра с истинным пиком нагрузки невысока, что может приводить к занижению абсолютных значений суммарной нагрузки и к незначительному смещению расчётных координат CoP. В качестве способов коррекции в дальнейшем рассматриваются интерполяция значений между соседними кадрами и применение более быстрого аналого-цифрового преобразователя с частотой опроса не менее 100 Гц. Дополнительным источником погрешности является масса и деформация перчатки: оболочка GREEN HILL 12 oz (340 г) демпфирует часть энергии удара, а деформация ударной поверхности при контакте может перераспределять нагрузку между соседними чувствительными элементами. Калибровка матрицы проводилась статическими эталонными нагрузками (10%, 50% и 90% диапазона), тогда как при динамическом ударе из-за вязкоупругости материалов возможна дополнительная погрешность показаний, что требует в перспективе проведения динамической калибровки сенсорной системы [13, 14].

Показатели SD, 95% ДИ и CV, рассчитанные по 32 лучшим попыткам, отражают межиндивидуальную вариативность и не являются оценкой тест-ретестовой надёжности. Отдельная валидационная серия с повторными ударами показала высокую связь с эталонным силомером, то есть поддерживает критериальную валидность устройства, но ICC и стандартная ошибка измерения для повторяемости в ней не рассчитывались. Поэтому в настоящей статье исключены формулировки о доказанной воспроизводимости; для такой оценки необходимы серийные повторные попытки с расчётом ICC/SEM.

Матрица была фиксированно интегрирована в одну модель GREEN HILL 12 oz, а её активная область ориентировалась на основную ударную поверхность и проекцию пястно-фаланговых суставов. В отдельной валидации той же конструкции усреднённая карта 30 ударов демонстрировала максимум в области M10–M15, анатомически соответствующей проекции пястно-фаланговых суставов, что подтверждает способность системы регистрировать функционально значимую зону контакта. Однако индивидуальная геометрическая нормализация положения матрицы относительно суставов у спортсменов с разным размером кисти не выполнялась/не была документирована в представленных материалах; это ограничение может увеличивать межиндивидуальную вариативность CoP и локальных ячеек.

Перспективы дальнейшей работы включают повышение частоты опроса матрицы не менее чем до 100 Гц, динамическую калибровку, аппаратную синхронизацию, анализ прямых ударов и ударов снизу, сравнение правой и левой руки и весовых категорий, а



также интеграцию с кинематическими датчиками и системами компьютерного зрения. При накоплении достаточного массива данных возможно применение алгоритмов машинного обучения [20].

Выводы

1. Сенсорная перчатка с матрицей 8×8 позволяет получать пространственную карту контактной нагрузки при выполнении бокового удара максимальной интенсивности и дополняет высокочастотную регистрацию силы силомером.
2. У 32 боксёров средняя максимальная сила по CROCUS составила 2975,5 Н (SD=486,2 Н), а средняя суммарная контактная нагрузка матрицы – 683,6 Н (SD=118,6 Н). CV 11,6–17,4% отражают межиндивидуальную вариативность, а не тест-ретестовую воспроизводимость.
3. На групповой нормированной карте CoP находился в координатах $X=4,78$, $Y=4,52$; максимальная ячейка M29 имела значение 35,6 Н. Значения отдельных ячеек относятся к агрегированной групповой карте и не являются индивидуальными пиковыми значениями.
4. Центральная зона 4×4 включала 52,7% групповой нормированной нагрузки. Соотношения правой/левой и верхней/нижней половин имеют описательный характер; статистически устойчивую асимметрию можно подтверждать только по индивидуальным парным данным.
5. Показатель 23,0% между суммарной нагрузкой матрицы и CROCUS нельзя трактовать как коэффициент передачи силы. Отдельная валидация той же системы выявила сильную линейную связь с CROCUS ($r=0,911$) при систематическом занижении абсолютных значений и снижении средней относительной ошибки с 75,7% до 12,1% после линейной коррекции.
6. Для оценки тест-ретестовой надёжности, статистической асимметрии и диагностически значимых порогов CoP необходимы индивидуальные повторные измерения, ICC/SEM, парные статистические тесты, более высокая частота опроса и аппаратная синхронизация.

Заключение

Проведённое исследование показало, что гибридная измерительная система, объединяющая сертифицированный силомер CROCUS и носимую пьезорезистивную матрицу 8×8 , интегрированную в боксёрскую перчатку, позволяет одновременно регистрировать как интегральный соревновательный показатель дисциплины «удар на силу» – пиковую максимальную силу удара, так и пространственное распределение контактной нагрузки на ударной поверхности перчатки. Апробация на группе из 32 квалифицированных боксёров подтвердила работоспособность и информативность предложенного подхода: полученные значения силы (2975,5 Н), суммарной контактной нагрузки (683,6 Н), положения центра давления ($X=4,78$; $Y=4,52$) и концентрации нагрузки в центральной зоне 4×4 (52,7%) согласуются между собой и образуют целостную картину ударного действия.

Следует признать ряд ограничений настоящего исследования. Во-первых, частота опроса сенсорной матрицы (10 Гц) существенно ниже длительности ударного импульса,



что вносит потенциальную погрешность в оценку абсолютных значений пикового кадра; данное ограничение может быть преодолено увеличением частоты опроса и применением интерполяции. Во-вторых, калибровка матрицы выполнялась статическими нагрузками, тогда как динамические условия удара требуют дополнительной верификации показаний. В-третьих, выборка из 32 спортсменов достаточна для первичной апробации, но не позволяет распространять выводы на все весовые категории и уровни подготовленности без дополнительных исследований.

Перспективы дальнейшей работы связаны с расширением выборки, включением других типов ударов (прямой, апперкот), повышением частоты опроса сенсорной системы и разработкой методических рекомендаций по использованию карт контактной нагрузки в тренировочном процессе и при сертификации боксёрской экипировки.

Список литературы / References

1. Chaabène H., Tabben M., Mkaouer B., Franchini E., Negra Y., et al. Amateur boxing: physical and physiological attributes. *Sports Medicine*, 2015, 45 (3), pp. 337–352. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0274-7>
2. Smith M.S., Dyson R.J., Hale T., Janaway L. Development of a boxing dynamometer and its punch force discrimination efficacy. *Journal of Sports Sciences*, 2000, 18 (6), pp. 445–450. <https://doi.org/10.1080/02640410050074377>
3. Atha J., Yeadon M.R., Sandover J., Parsons K.C. The damaging punch. *British Medical Journal*, 1985, 291 (6511), pp. 1756–1757. <https://doi.org/10.1136/bmj.291.6511.1756>
4. Walilko T.J., Viano D.C., Bir C.A. Biomechanics of the head for Olympic boxer punches to the face. *British Journal of Sports Medicine*, 2005, 39 (10), pp. 710–719. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2004.014126>
5. Pierce J.D., Reinbold K.A., Lyngard B.C., Goldman R.J., Pastore C.M. Direct measurement of punch force during six professional boxing matches. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 2006, 2 (2), 3. <https://doi.org/10.2202/1559-0410.1004>
6. Whiting W.C., Gregor R.J., Finerman G.A. Kinematic analysis of human upper extremity movements in boxing. *American Journal of Sports Medicine*, 1988, 16 (2), pp. 130–136. <https://doi.org/10.1177/036354658801600207>
7. Mack J., Stojših S., Sherman D., Dau N., Bir C. Amateur boxer biomechanics and punch force. *Proceedings of the 28th International Conference on Biomechanics in Sports*, 2010, pp. 19–23.
8. Lenetsky S., Harris N., Brughelli M. Assessment and contributors of punching forces in combat sports athletes: implications for strength and conditioning. *Strength and Conditioning Journal*, 2013, 35 (2), pp. 1–7. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e31828b6c12>
9. Stanley E., Thomson E., Smith G., Lamb K.L. An analysis of the three-dimensional kinetics and kinematics of maximal effort punches among amateur boxers. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 2018, 18 (5), pp. 835–854. <https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1525651>
10. Dinu D., Louis J. Biomechanical analysis of the cross, hook, and uppercut in junior vs. elite boxers: implications for training and talent identification. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2020, 2, 598861. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.598861>
11. Menzel T., Potthast W. Validation of a novel boxing monitoring system to detect and analyse the center of pressure movement on the boxer's fist. *Sensors*, 2021, 21 (24), 8394. <https://doi.org/10.3390/s21248394>
12. Menzel T., Potthast W. Validation of a unique boxing monitoring system. *Sensors*, 2021, 21 (21), 6947. <https://doi.org/10.3390/s21216947>
13. Jovanovski A., Stappenbelt B. Measuring the boxing punch: development and calibration of a non-embedded in-glove piezo-resistive sensor. *Proceedings*, 2020, 49 (1), 13. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020049013>
14. Yousef H., Boukallel M., Althoefer K. Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics – a review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 167 (2), pp. 171–187. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.02.038>
15. Trung T.Q., Lee N.E. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring. *Advanced Materials*, 2016, 28 (22), pp. 4338–4372. <https://doi.org/10.1002/adma.201504244>



16. Amjadi M., Kyung K.-U., Park I., Sitti M. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: a review. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26 (11), pp. 1678–1698. <https://doi.org/10.1002/adfm.201504755>
17. Li R.T., Kling S.R., Salata M.J., Cupp S.A., Sheehan J., Voos J.E. Wearable performance devices in sports medicine. *Sports Health*, 2016, 8 (1), pp. 74–78. <https://doi.org/10.1177/1941738115616917>
18. Chambers R., Gabbett T.J., Cole M.H., Beard A. The use of wearable microsenors to quantify sport-specific movements. *Sports Medicine*, 2015, 45 (7), pp. 1065–1081. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0332-9>
19. Camomilla V., Bergamini E., Fantozzi S., Vannozzi G. Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: a systematic review. *Sensors*, 2018, 18 (3), 873. <https://doi.org/10.3390/s18030873>
20. Cust E.E., Sweeting A.J., Ball K., Robertson S. Machine and deep learning for sport-specific movement recognition: a systematic review of model development and performance. *Journal of Sports Sciences*, 2019, 37 (5), pp. 568–600. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1521769>
21. Perkins P., Jamieson A., Ferguson G., Spratford W., Hahn A. Iterative design of impact-damping gloves for safer boxing. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 8 (3), pp. 49–97. <https://doi.org/10.4236/ojsst.2018.83005>

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no relevant conflict of interests.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Цуй Хунда (Cui Hongda) – разработка методологии, проведение инструментального тестирования, обработка данных, написание исходного текста. / Methodology, data collection, data processing, Writing – original draft.

Горбачев С.С. (Gorbachev S.S.) – концептуализация, научное руководство, рецензирование и редактирование текста. / Conceptualization, supervision, Writing – review & editing.

Аганов С.С. (Aganov S.S.) – формальный анализ, рецензирование и редактирование текста. / Formal analysis, Writing – review & editing.

Информация об авторах / Information about the authors

Цуй Хунда – Российский университет спорта «ГЦОЛИФК» (105122, Российская Федерация, г. Москва, Сиреневый бульвар, д. 4) / Cui Hongda – Russian University of Sport “GTSOLIFK” (4 Sirenevyy Boulevard, Moscow, 105122, Russian Federation); cuihdsd@gmail.com; ORCID: 0009-0009-2060-8914.

Горбачев Станислав Сергеевич – кандидат педагогических наук, профессор, Кафедра бокса, кикбоксинга и восточных боевых искусств им. К.В. Градополова, Российский университет спорта «ГЦОЛИФК» (105122, Российская Федерация, г. Москва, Сиреневый бульвар, д. 4) / Stanislav Gorbachev – Candidate of Pedagogical Sciences, Professor, Department of Boxing, Kickboxing and Oriental Martial Arts named after K.V. Gradoplov, Russian University of Sport “GTSOLIFK” (4 Sirenevyy Boulevard, Moscow, 105122, Russian Federation); gorbachev.ss@gtsolifk.ru; ORCID: 0000-0003-2226-451X.



Аганов Сергей Самуилович – доктор педагогических наук, профессор, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149) / *Sergey Aganov* – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 196105, Russian Federation); *aganov.s@igps.ru*; ORCID: 0000-0002-1284-3780.

Цитирование / Citation

Цуй Х., Горбачев С.С., Аганов С.С. Цифровая регистрация пространственного распределения контактной нагрузки на ударной поверхности боксёрской перчатки при выполнении бокового удара в дисциплине «удар на силу» // Российский журнал информационных технологий в спорте. 2026. Т. 3, № 3. e202612. <https://doi.org/10.62105/2949-6349-2026-3-3-e202612> EDN FNLIVE

Cui H., Gorbachev S.S., Aganov S.S. Digital registration of the spatial distribution of contact load on the striking surface of a boxing glove during hook punches in the “strike force” discipline. *Russian Journal of Information Technology in Sports*, 2026, 3 (3), e202612. (in Russ.) <https://doi.org/10.62105/2949-6349-2026-3-3-e202612> EDN FNLIVE

Получено/Received: 14.06.2026

Одобрено/Accepted: 03.09.2026

Опубликовано/Published: 19.09.2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 International
This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International

