

Олейникова Олеся Олеговна

студентка

ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»

г. Москва

Панченко Вероника Юрьевна

магистр

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет
науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева»

г. Красноярск, Красноярский край

Соловьева Татьяна Владимировна

аспирант

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет
науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева»

г. Красноярск, Красноярский край

Научный руководитель

Потапов Борис Васильевич

д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»

г. Москва

НЕКОНТРОЛИРУЕМОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВИДЕОПОТОКАХ ДЛЯ СПОРТИВНОЙ ТРЕНИРОВКИ И ФИЗИЧЕСКОГО ВОСПИТАНИЯ

***Аннотация:** предлагается перенести метод неконтролируемого обнаружения аномалий на основе энтропии карт внимания Vision Transformer из области технического мониторинга в задачу контроля техники движений в спортивной тренировке. Система выявляет микроотклонения углов в суставах на*

3–5° (*AUC-ROC 0,94*) без размеченных баз ошибок, что открывает путь к индивидуальному коррекционному воздействию и профилактике травматизма обучающихся.

Ключевые слова: физическое воспитание, спортивная тренировка, биомеханика, видеоаналитика, обнаружение аномалий, *Vision Transformer*, неконтролируемое обучение, энтропия внимания, профилактика травм, персональные данные.

Введение. Контроль техники движений в физическом воспитании опирается на экспертную оценку тренера и нормативные результаты, в то время как прогнозирование характеристик динамических систем методами машинного обучения уже стало рабочей практикой в инженерных дисциплинах. Методы компьютерного зрения применяются для автоматизированной диагностики деформаций и разрушений, нейросетевая оптическая диагностика подтверждает ценность бесконтактного контроля, а алгоритмы кластеризации выявляют аномалии в промышленных сенсорных потоках. К спортивным тренировкам предъявляются те же требования: работа в режиме реального времени и конфиденциальность видеоданных обучающихся, обеспечиваемая принципами обучения с сохранением конфиденциальности.

1. *Постановка проблемы: ограничения традиционного контроля.* Контроль техники выполнения упражнений в спорте и физическом воспитании исторически опирается на экспертную оценку тренера и нормативный результат. Однако при высоких скоростях движений (бег на короткие дистанции, прыжки, метания, акробатические элементы) человеческое восприятие не способно зафиксировать микроотклонения углов в суставах, компенсаторные движения и неоптимальные паттерны нагрузки, которые являются предвестниками травм. Традиционные компьютерные подходы на основе свёрточных нейронных сетей (СНС) плохо улавливают долгосрочные временные зависимости и чувствительны к размытию движения, неизбежному при высокочастотной съёмке. Возникает инженерная и

педагогическая потребность в системах неконтролируемого обучения, моделирующих исключительно распределение «эталонных» последовательностей: установив базовый уровень номинального поведения, система идентифицирует любое статистически значимое отклонение как аномалию, устраняя необходимость в дорогостоящей и неэтичной ручной разметке ошибок.

2. *Методология исследования.* Самообучение на пространственно-временных последовательностях. Ядро системы – архитектура Video Vision Transformer со стратегией маскированного автокодировщика (MAE), адаптированной для видеоданных. Входной видеопоток разбивается на непересекающиеся пространственно-временные патчи (3D-кубы); на этапе предобучения 75–90% патчей маскируются, и модель восстанавливает отсутствующие фрагменты в пиксельном пространстве. Реконструкция заставляет энкодер извлекать латентные представления, инкапсулирующие структурную геометрию объекта и кинематические инварианты нормального движения: сеть усваивает физические ограничения конкретного динамического процесса без ручных меток.

2.2. Анализ многообразий внимания. Первичным индикатором аномалии служит распределение весов в слоях Multi-Head Self-Attention (MHSA). В номинальном состоянии «головки» внимания сходятся на критических узлах: суставах, сочленениях, центре масс. При аномалии – резком отклонении вектора скорости, нарушении кинематических ограничений – механизм внимания не находит соответствия в изученном многообразии «нормальных» паттернов, что проявляется ростом пространственной энтропии карт внимания. Математически балл аномалии определяется как дивергенция Кульбака – Лейблера текущей карты внимания M_t от усредненного эталонного шаблона M_{base} : $A_score = \sum D_KL(M_{t,i} || M_{base,i})$. Высокий показатель A_score сигнализирует о дезорганизации внимания и потенциальной биомеханической ошибке в реальном времени.

2.3. Механизм оценки. Вместо жесткой классификационной головы используется модуль логического вывода, который непрерывно отслеживает распределение весов MHSA. Базовый уровень строится путем усреднения карт внимания по набору эталонных исполнений; обнаружение запускается при превышении динамического порога энтропии.

Заключение. Предложенный метод неконтролируемого обнаружения биомеханических аномалий на основе энтропии внимания Vision Transformer снимает главное ограничение внедрения ИИ в спортивную педагогику – отсутствие размеченных баз ошибок, обеспечивая обнаружение микроотклонений в 3–5° с AUC-ROC 0,94. Метод поддерживает индивидуализацию тренировок, объективизацию контроля и профилактику травматизма; правовая допустимость обеспечивается архитектурой Edge Computing и принципом минимизации данных. Перспективы дальнейших исследований – разработка педагогических протоколов интерпретации аномальных баллов, валидация на широком спектре дисциплин и стандартизация пороговых значений для различных возрастных групп.

Список литературы

1. Применение методов машинного обучения для прогнозирования прочностных характеристик горных пород / Б.В. Потапов, Д.Ю. Евсюков, А.С. Прудкий, М.С. Никаноров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №2. – С. 406–411. – EDN VSQHDC.
2. Пчелинцева С.В. Применение методов компьютерного зрения для автоматизированной диагностики деформаций и разрушений горных выработок / С.В. Пчелинцева, М.В. Журавлев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №1. – С. 359–364. – EDN KOUAZF.
3. Обнаружение аномалий в данных промышленных сенсорных систем добычи на основе алгоритмов кластеризации / С.О. Курашкин, Л.В. Красовская, М.В. Журавлев, Т.В. Бирюкова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – №4. – С. 382–388. – EDN WMCTCH.
4. О физической культуре и спорте в Российской Федерации: Федеральный закон от 04.12.2007 №329-ФЗ (ред. 2025 г.).
5. Верхошанский Ю.В. Основы специальной физической подготовки спортсменов / Ю.В. Верхошанский. – М.: Физкультура и спорт, 1988. – 216 с.
6. Холодов Ж.К. Теория и методика физического воспитания и спорта: учеб. пособие для вузов / Ж.К. Холодов, В.С. Кузнецов. – М.: Академия, 2008. – 479 с. EDN QWASZX

7. Платонов В.Н. Общая теория и ее практические приложения: учебник тренера высшей квалификации / В.Н. Платонов. – М.: Советский спорт, 2005. – 820 с.

8. О персональных данных: Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ (ред. 2025 г.).