

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ДЕТСКОМ СПОРТЕ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И НЕЙРО-НЕЧЕТКОГО АНАЛИЗА

Д.Г. Арсеньев (*arsenjevasp@yandex.ru*)^A

А.А. Велков (*6339743@mail.ru*)^B

А.Е. Мисник (*anton@misnik.by*)^C

М.А. Шалухова (*shaluhova.m@yandex.ru*)^{A,C}

^A Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург

^B Чайковская государственная академия физической культуры
и спорта, Чайковский

^C Белорусско-Российский университет, Республика Беларусь,
Могилев

В работе рассматривается концепция интеллектуальной системы поддержки принятия решений для детского спорта. Предлагается архитектура, включающая модуль компьютерного зрения, цифровой профиль спортсмена (цифровой двойник), онтологическую базу знаний и нейро-нечеткий модуль для вынесения рекомендаций. Предлагаемая система способна обеспечить дистанционный мониторинг техники выполнения упражнений, персонализировать план нагрузок с учетом возраста и подготовки, выявлять различные отклонения при выполнении тренировки в режиме реального времени. Проведено сравнение традиционного подхода в работе тренера с данными методами цифрового контроля, рассмотрены ключевые компоненты системы, и алгоритмы обработки получаемых системой данных. Интеграция подобных систем в детский спорт позволяет повышать объективность оценки прогресса, позволяет эффективно строить индивидуальные траектории развития, снижает риск травм и открывает новые прикладные возможности в области построения систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: ранняя спортивная специализация; интеллектуальная система поддержки решений; компьютерное зрение; цифровой двойник; нейро-нечеткие системы; сверточные нейронные сети; персонализация тренировок.

Введение

Управление тренировочным процессом и объективная оценка функционального состояния опорно-двигательного аппарата спортсмена является сложной многопараметрической задачей, требующей слаженной работы как тренера и медицинского персонала, так и непосредственно спортсмена. Рассматривая детский спорт, задача приобретает дополнительную сложность, связанную в первую очередь с особенностями формирования костно-мышечной структуры, а также обусловленная влиянием профессионального спорта на рост и развитие опорно-двигательного аппарата спортсмена.

Наиболее распространённым традиционным подходом к отбору будущих спортсменов и построению их тренировочных планов является ранняя спортивная специализация, которая подразумевает интенсивную узконаправленную нагрузку на опорно-двигательный аппарат спортсмена в период его активного формирования, особенно в технически сложных видах спорта [Baker et al., 2022]. Однако, несмотря на высокие достижения, ряд исследований демонстрирует негативные последствия ранней специализации спортсменов в долгосрочной перспективе: риск травм перегрузочного характера выше на 50-80% по сравнению с ровесниками, тренирующимися разнообразно. Нередко спортсмены уже в подростковом возрасте имеют ряд профессиональных заболеваний, связанных с особенностями практикуемого спорта, а также хронический болевой синдром [Kolt, 1999], [Popkin et al., 2019].

Учитывая колоссальные затраты времени, средств и здоровья, на подготовку профессиональных спортсменов, наиболее актуальные тенденции подготовки строятся на поиске альтернативных моделей. Модели, включающие раннюю диверсификацию в концепцию долгосрочного развития, способствуют достижению спортсменами наилучших результатов и продлению пиковой формы, за счет сочетания гармонизации тренировочной нагрузки и снижения рисков профессионального травматизма [Bergeron et al., 2015].

Для построения адекватной траектории развития юного спортсмена при обозначенном подходе необходимо учитывать множество факторов: от физического развития и техники исполнения до психоэмоционального состояния юного спортсмена. Составление таких программ является трудоёмкой: для принятия решений о режиме тренировок, степени нагрузок, необходимости отдыха или смены специализации требуется обработать колоссальный объем разноплановых данных с учетом многофакторной модели управления тренировочным процессом [Balyi, 2004].

Человеческие возможности по обработке такого объема разноплановой информации ограничены: специалист может субъективно оценивать лишь часть параметров одновременно, не застрахован от когнитивных искажений и ошибок, в результате чего значимые сигналы – признаки переутом-

ления, ошибки техники, постепенно снижающаяся мотивация – могут остаться незамеченными. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений (СППР), широко применяемые сегодня в различных отраслях, предлагают решение указанных проблем за счет интеграции методов искусственного интеллекта, способных оперативно обрабатывать большие объемы данных, выявлять скрытые закономерности и выдавать обоснованные рекомендации [Кривецкий и др., 2013].

Применение в детском спорте интеллектуальной СППР позволит производить непрерывный мониторинг тренировочного процесса, анализировать технику выполнения упражнений, следить за динамикой физических показателей, а также учитывать субъективные данные (самочувствие, уровень усталости). На основе комплексного анализа, система способна в реальном времени сигнализировать о проблемах (например, о чрезмерной нагрузке или ухудшении техники), рекомендовать индивидуальные корректировки плана тренировок, а также оптимизировать построение тренировочного процесса, качественно улучшая его, благодаря сочетанию объективного анализа данных с экспертными знаниями тренеров [Терёхин и др., 2022].

1. Архитектура интеллектуальной системы

Предлагаемая система представляет собой СППР, объединяющую модуль предобработки и сбора данных, центральную базу данных, модель «цифрового двойника» спортсмена, интеллектуальный модуль анализа и принятия решений (включая нейронные сети и нечеткую логику), и интерфейсные приложения для пользователей – тренеров, спортсменов, врачей. В связи со спецификой работы по разработке и поддержке системных и информационно-аналитических процессов в сложных кибер-физических системах для работы был выбран онтологический подход.

Для реализация данного подхода нами была разработана программно-инструментальная среда, позволяющая специалистам в предметной области проектировать онтологию и бизнес-процессы, на основе мета-ассоциативного графа, который включает в себя процессную составляющую в виде методов и событий [Borisov et al., 2023a].

Онтологическое представление позволяет представить конфигурацию интеллектуальной системы поддержки принятия решений, которая впоследствии может быть дополнена и расширена (рис. 1).

Архитектура предусматривает возможность развертывания серверной части (включая базы данных и модуль анализа данных) на облачной платформе, либо локально в спортивной школе. Модульная реализация позволяет поэтапное введение функций: от простого модуля оценки техники выполнения по видео до сложной СППР, путем постепенного подключения необходимых модулей и компонентов. Наличие необходимых модулей исходит из задач, поставленных перед системой. Рассмотрим основные задачи, поставленные перед модулями СППР в детском спорте.

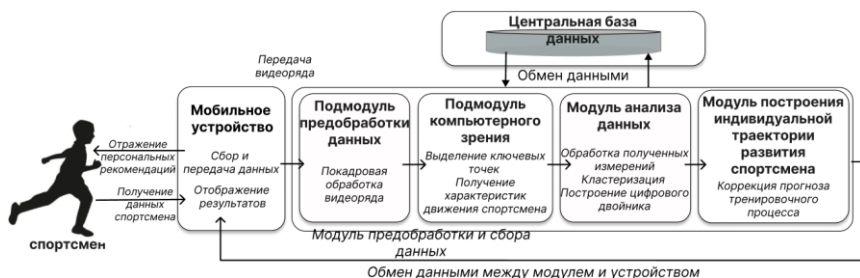


Рис. 1. Общая схема взаимодействия модулей системы

Так как система получает данные для анализа с помощью видеосъемки, необходимо использовать предобработку данных, ведь качество входных данных существенно влияет на достоверность итогового прогноза. Шум, недостаточная освещённость при съёмке, а также неоднородность качества изображений, получаемых с различных устройств – всё это существенно снижает достоверность информации, поступающей в систему. Таким образом, совершенствование модуля предобработки данных является актуальной задачей при разработке интеллектуальной СППР [Borisov et al., 2023b]. В разработанной системе предобработка данных выполняется в несколько этапов:

Применение фильтра Калмана не требует больших вычислительных ресурсов, эффективно сглаживает шум, корректирует траекторию движения объекта на основе наблюдений и нивелирует дрожание видео. В результате координаты опорных точек становятся более стабильными, что позволяет при дальнейшем анализе получать достаточную точность, для определения аномалий функционального развития опорно-двигательного аппарата, либо выявления отклонений от заданных паттернов движений (рис. 2).

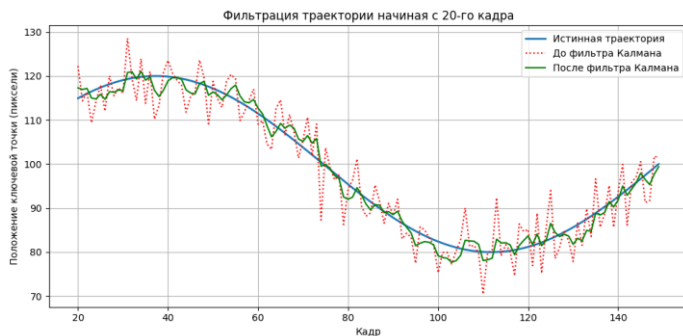






















Рис. 2. Влияние применения фильтра Калмана для предобработки положения опорных точек

Для контроля получаемых результатов, используются данные зафиксированных физиологических и антропометрических параметров спортсменов, получаемые при регулярном обследовании, и хранящиеся в системном профиле спортсмена. На следующем этапе проводится нормализация данных: координаты опорных точек приводятся к единой системе координат относительно антропометрических параметров спортсмена, что позволяет корректно оценивать тренировочный прогресс с различными индивидуальными особенностями строения. В результате на вход модели поступает нормализованная поза спортсмена, полученная путём масштабирования и центрирования. Для повышения устойчивости системы обучающая база данных была качественно улучшена и расширена до 5000 видеофайлов (рис. 3).

Result of diagnostic ↑↓	Exercise ↑↓	Input video ↑↓	Output video ↑↓
спазм круглой мышцы слев...	Вращение плеча лежа	  input.mp4	  input.mp4
спазм длинного разгибатель...	Вращение плеча лежа	  input.mp4	  input.mp4
спазм круглой мышцы слев...	Поворот бедер лежа на ...	  input.mp4	  input.mp4
спазм длинного разгибатель...	Поворот бедер лежа на ...	  input.mp4	  input.mp4
спазм круглой мышцы слев...	Повороты стопы сидя	  input.mp4	  input.mp4

Показано 1 - 6 из 5048 записей.

Рис. 3. Загруженные в систему видеоматериалы

На первом этапе видеоматериалы были обработаны модулем компьютерного зрения, после чего результаты автоматической разметки были проверены и откорректированы специалистами вручную для обеспечения высокой точности.

Одной из главных задач системы является мониторинг техники и физического состояния в реальном времени. Используя для получения данных модуль компьютерного зрения, а как источник видеоряда камеру мобильного устройства, система отслеживает положение тела ребенка при выполнении упражнений: фиксирует ключевые точки (суставы, конечности) и сравнивает технику с эталонными моделями. Для более полной характеристики движения считываются показатели нагрузки (скорость выполнения, число повторений, динамическая устойчивость), что позволяет своевременно обнаружить критические ошибки в технике выполнения и предупредить возможную травму [Hoang et al., 2021].

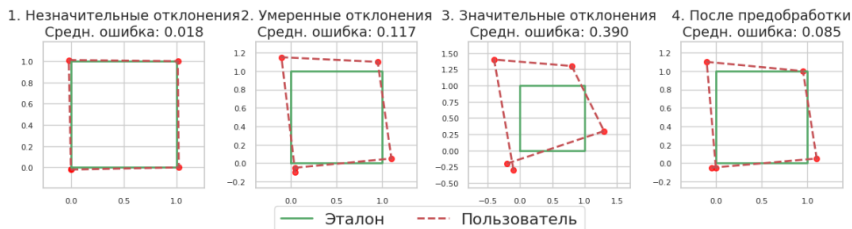


Рис. 4. Сравнение движения спортсмена и эталона

Второй частью успешного управления тренировочным процессом является адаптация нагрузок к текущему функциональному состоянию опорно-двигательного аппарата и индивидуализация тренировочных планов. Для отслеживания психоэмоционального состояния спортсменов, а также последующего анализа его влияния на тренировочный процесс и достигаемые результаты, применяется метод анкетирования. Для допуска к тренировке спортсмен проходит короткий тест в приложении, что позволяет специалисту учесть самооценку состояния, а также внести свои пометки в блок анкетирования. Регулярный учет психоэмоционального состояния спортсмена, при достаточном времени наблюдения, позволяет адаптировать тренировочную нагрузку под индивидуальные особенности. На основе данных о прогрессе каждого спортсмена, с помощью методов нейро-нечеткого анализа, позволяющих имитировать рассуждения опытного тренера (в виде набора правил если-то) и одновременно обучаться на накопленных данных, система предлагает тренеру возможные корректировки в текущий тренировочный план: отслеживая снижение либо устойчивый рост качественных показателей во время тренировочного процесса, согласно заложенным правилам система предложит либо снизить нагрузку на 10–15%, либо рекомендует усложнение задач [Jang, 1993].

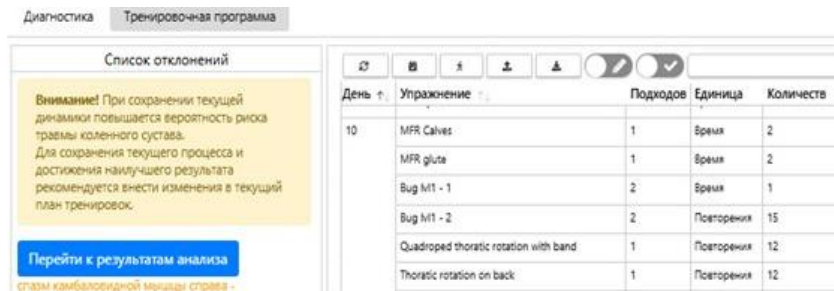


Рис. 5. Рекомендательная система. Оценка риска травмы

Для долгосрочного планирования и построения адекватных траекторий развития спортсменов на продолжительном отрезке времени необходимо прогнозировать потенциальные риски и ожидаемые результаты. Аккумулируя и анализируя данные многих спортсменов различных направлений подготовки, нейросетевые алгоритмы способны прогнозировать вероятность определенных исходов. Наблюдая рост вероятности риска травмы, отслеживаемый по совокупности факторов – увеличение объема тренировок, эмоциональное состояние, ростовой скачок у подростка, возникновение симптомов перетренированности – система не только оповестит тренера о необходимости профилактических мер, но и предложит конкретные пути решения. Соотнося прогноз вероятности риска травм с прогнозом роста спортивных результаты, система позволяет обоснованно строить и корректировать долгосрочный план подготовки [Wang et al., 2022].

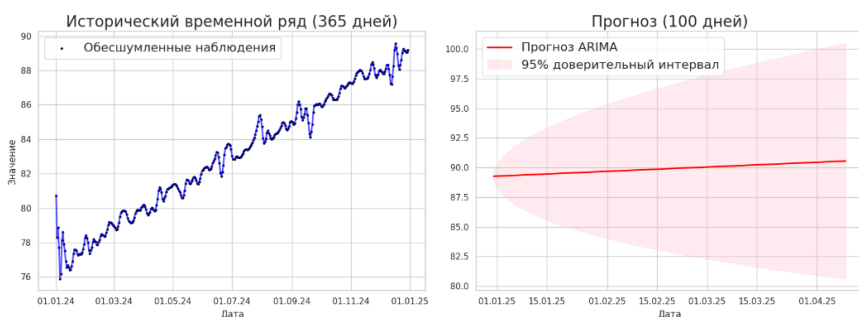


Рис. 6. Долгосрочная траектория развития спортсмена

Еще одним условием управления тренировочным процессом является получение обратной связи и поддержание мотивации. Автоматизация составления отчетов о ходе тренировочного прогресса и результатах позволяют визуализировать прогресс в показателях, что помогает в целеполагании спортсмена. Обратная связь системы объективна, что повышает мотивацию у детей, есть возможность вносить элементы игровой методики (достижения) и делает процесс тренировки более интересным. Родители же получают конкретные результаты в виде отчетов, а также уверенность, что за состоянием ребенка ведется тщательное наблюдение.

Отметим аспект накопления знаний и опыта: накапливая данные о тысячах тренировочных сессий, система фактически создает базу знаний, из которой можно извлекать новые неочевидные закономерности, позволяя влиять на траектории развития навыков, выявлять маркеры перетренированности на ранних стадиях, снижая риск спортивного травматизма, а также объективно оценивать возможный прогресс [Borisov et al., 2023b].

2. Сравнительный анализ СППР и классического подхода

Интеллектуальная СППР для детского спорта может быть внедрена в разных форматах – от персонального тренера-ассистента отдельному спортсмену до комплексной системы мониторинга, однако цифровой подход при любом из сценариев имеет существенные отличия от классического.

Проанализировав предметную область, ключевые отличия подходов представлены в виде табл. 1.

Таблица 1

Аспект тренировочного процесса	Классический подход	Цифровой подход
1. Объективность оценки техники и нагрузок		
Форма оценки	Субъективная, по впечатлениям тренера	Автоматическая, по метрикам
Инструменты	Визуальное наблюдение, разовые тесты	Видео аналитика, алгоритмы СППР
Точность	Ошибки легко упустить, мелкие отклонения игнорируются	Высокая детализация: углы, частота движений, и др.
Регулярность контроля	Периодический	Непрерывный в реальном времени,
2. Персонализация тренировок		
Подход	Унифицированная программа для группы	Индивидуальный план на базе данных спортсмена
Основание для плана	Возраст, уровень, личный опыт тренера	Профиль спортсмена, цифровой двойник, динамика прогресса, кластеризация
Частота корректировок	Эпизодически, по жалобам или падению результатов	Регулярно (неделя, день) в ответ на изменения
Учет индивидуальных параметров	Ограниченный: реакция по факту	Автоматически учитываются рост, уровень техники, состояние и мотивация
3. Раннее выявление проблем		
Обнаружение проблем	По жалобам или ухудшению техники/результата	По снижению биомеханических показателей или отклонениям от динамики
Типичные риски	Усталость, травмы, выгорание замечаются поздно	СППР сигнализирует заранее при снижении параметров или психоэмоциональном состоянии

Аспект тренировочного процесса	Классический подход	Цифровой подход
Реакция тренера/системы	После факта обнаружения проблемы	Прогноз вероятности риска и предложение корректировок программы
4. Масштабируемость и охват		
Максимальная нагрузка на тренера	До 10–15 человек эффективно	30+ спортсменов под контролем через цифровые панели
Индивидуализация при большой группе	Сложно, качество падает	Сохраняется благодаря автоматизированной аналитике
Удалённое сопровождение	Трудно или невозможно	Возможно через облако, тренер получает цифровые отчёты
5. Принятие стратегических решений		
Основа решений	Опыт, ощущения, “интуиция” тренера	Данные, аналитика, прогнозные сценарии
Планирование	По сезону, без симуляции будущих сценариев	Сценарное моделирование “что если”, построение индивидуальных траекторий
Прогноз результата	Интуитивный, опирающийся на личный опыт	Моделируется нейросетями по текущим данным спортсмена

Дистанционный и персонифицированный характер работы системы переводит профилактику травм и управление нагрузками из реактивного подхода к проактивному. Эффективность системы во многом зависит от качества получаемых данных, поэтому на этапе внедрения в процесс тренировок необходим контроль со стороны специалистов за системой, постепенно повышая доверие и вписывая её работу в существующий процесс.

Заключение

Внедрение систем поддержки принятия решений, основанных на компьютерном зрении и нейро-нечетком анализе, представляет собой перспективное направление, в том числе для развития детского спорта и спортивной науки в целом. Проведенное исследование показывает, что такая система способна решить ряд острых проблем, сопутствующих ранней спортивной специализации и интенсивным тренировкам детей. Научная значимость внедрения таких систем состоит в междисциплинарной работе: объединение знаний и методов педагогики, физиологии, информационных технологий, искусственного интеллекта для решения комплексной задачи.

Работа демонстрирует эффективность объединения современных методов искусственного интеллекта (CNN, LSTM, нейро-нечеткие сети) с классическими теориями спорта, что позволяет построить эффективный инструмент управления тренировочным процессом. Особенностью системы является динамическое обновление данных цифрового двойника, что позволяет повысить адаптивность разработанной системы к функциональным изменениям опорно-двигательного аппарата спортсмена, в том числе характерным возрастным и индивидуальным, учитывать текущее состояние и строить более точные траектории развития. Такой подход способствует развитию всех задействованных дисциплин, с помощью создания новых алгоритмов анализа биомеханических данных, улучшенные системы распознавания действий человека в прикладной среде.

Список литературы

- [Арсеньев и др., 2023] Арсеньев Д.Г., Мисник А.Е., Шалухова М.А. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления процессом реабилитации пациентов после эндопротезирования суставов // Вестник СПбПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 45-57.
- [Кривецкий и др., 2013] Кривецкий И.Ю., Попов Г.И. Возможности применения технологии нейро-нечетких сетей в некоторых видах спорта // Информатика и системы управления. – 2013. – № 4(38). – С. 80-87.
- [Терёхин и др., 2022] Терёхин А.Д., Ильялов О.Р., Степанов А.В. Система оценивания спортивных упражнений по нейросетевому анализу видеоряда // Прикладная математика и вопросы управления. – 2022. – № 1(29). – С. 75-86.
- [Baker et al., 2022] Baker J., Mosher A. [и др.] Revisiting early sport specialization: What's the problem? // Sports Health. – 2022. – 14(1). – P. 20-26.
- [Balyi, 2004] Balyi I., Hamilton A. Long-Term Athlete Development: Trainability in Childhood and Adolescence // Olympic Coach. – 2004. – 16(1). – P. 4-9.
- [Bergeron et al., 2015] Bergeron M.F. [и др.] The Youth Athlete: Do Training Patterns Trigger Growth Plate Injuries? // International Journal of Sports Physiology and Performance. – 2015. – 10(4). – P. 552-559.
- [Borisov et al., 2023a] Borisov V.V., Misnik A.E. Ontological Engineering of Interrelated Processes in Complex Cyber-Physical Systems // Proc. of the 6th Int. Scientific Conf. "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'22) (Cham, 2022). Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 566. – Cham: Springer, 2023. – P. 432-443. – doi: 10.1007/978-3-031-19620-1_39.
- [Borisov et al., 2023b] Borisov V.V., Misnik A.E., Velkov A.A., Shalukhova M.A. Application of Computer Vision Technologies to Reduce Injuries in the Athletes' Training // Proc. of the 7th Int. Scientific Conf. "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'23) (Cham, 2023). Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 777. – Cham: Springer, 2023. – P. 143-153. – doi: 10.1007/978-3-031-43792-2_14.
- [Hoang et al., 2021] Hoang V.T., Jo K.H. Practical analysis on architecture of EfficientNet // Proc. of IEEE HSI. – 2021. – P. 1-4.

- [Jang, 1993]** Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1993. – 23(3). – P. 665-685.
- [Kolt, 1999]** Kolt G.S., Kirkby R.J. Epidemiology of injury in elite and subelite female gymnasts: a comparison of retrospective and prospective findings // Br. J. Sports Med. – 1999. – 33(5). – P. 312-318.
- [Myer et al., 2016]** Myer G.D., Jayanthi N., DiFiori J.P. Sport specialization, Part I–II // Sports Health. – 2015–2016.
- [Osokin, 2018]** Osokin D. Real-time 2D Multi-Person Pose Estimation on CPU: Lightweight OpenPose // arXiv preprint. – 2018.
- [Popkin et al., 2019]** Popkin C.A., Bayomy A.F., Ahmad C.S. Early sport specialization // J. of the Am. Acad. of Orthop. Surgeons. – 2019. – 27(22): e995–e1000.
- [Wang et al., 2022]** Wang J. [et al.] NGCU: A new RNN model for time-series data prediction // Big Data Research. – 2022. – Vol. 27. – Art. 100296.