

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДА К МОНИТОРИНГУ ТРЕНИРОВОЧНОЙ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ ACWR: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ИСТОКИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

Е.В. ФЕДОТОВА
ФГБУ ФНЦ ВНИИФК, г. Москва

Аннотация

Цель аналитического обзора – выявить и систематизировать ключевые ограничения и основные направления методологической критики подхода к мониторингу тренировочной нагрузки на основе ACWR (Acute: Chronic Workload Ratio – соотношение между краткосрочной «острой» и долгосрочной «хронической» нагрузкой); провести обзор современных инновационных модификаций (математических, концептуальных, интегративных), направленных на повышение их научной обоснованности и практической применимости. Поиск проведен в базах PubMed, Google Scholar, Europe PMC, ScienceDirect; в обзор включена 41 публикация. Выявлено, что ограничения классического подхода (статистические артефакты, использование фиксированных параметров, игнорирование нелинейности и индивидуальности, узкий фокус) преодолимы благодаря разработкам по его совершенствованию, ключевые направления которых: нелинейные методы агрегации, динамические временные окна, персонализация профилей, многофакторная интеграция, применение машинного обучения. Важной тенденцией является отказ от использования ACWR как изолированного показателя и его трансформация из инструмента прогноза риска травм в один из ключевых элементов комплексной системы управления тренировочным процессом и поддержки принятия решений в практике спортивной подготовки.

Ключевые слова: тренировочная нагрузка, мониторинг, ACWR, модификация, EWMA, машинное обучение.

REFINING THE ACWR-BASED TRAINING LOAD MONITORING APPROACH: METHODOLOGICAL ORIGINS AND PROSPECTIVE SOLUTIONS

E.V. FEDOTOVA,
VNIIFK, Moscow city

Abstract

This analytical review aims to identify and systematize the key limitations and main methodological criticism of the ACWR (Acute: Chronic Workload Ratio) approach to training load monitoring, and to review contemporary innovative modification approaches (mathematical, conceptual, integrative) designed to enhance its scientific validity and practical applicability. A literature search was conducted in the PubMed, Google Scholar, Europe PMC, and ScienceDirect databases, and 41 publications were included the review. The analysis revealed that the limitations of the classical ACWR approach (statistical artifacts, use of fixed parameters, ignorance of non-linearity and individual variability, narrow focus) can be overcome through ongoing refinements. Key development directions include non-linear data aggregation methods, dynamic time windows, personalized athlete profiles, multifactorial integration, and the application of machine learning techniques. A significant emerging trend is the move away from using ACWR as an isolated metric. Instead, it is being transformed from a tool for injury risk prediction into a vital component of a comprehensive training process management system designed to support decision-making in sport practice.

Keywords: training load, athlete monitoring, ACWR, modification, EWMA, machine learning.

Введение

Эффективное управление тренировочной нагрузкой остается ключевым фактором максимизации спортивной результативности и минимизации рисков травматизма и перетренированности. Такой подход требует комплексного учета как внешней, так и внутренней нагрузки, поскольку адекватная оценка выполненной работы возможна лишь при понимании реакции организма на неё [1]. Переход от интуитивных решений к управлению, основанному на достоверных данных, в значительной степени обеспечивается квантификацией нагрузок [2, 3]. Особую

сложность представляют оценка суммарного тренировочного воздействия [4] и квантификация внутренней нагрузки [5], где психометрический метод sRPE зарекомендовал себя как перспективный для унификации оценки различных тренировочных модальностей [6, 7].

Необходимость ежедневного управления тренировочным процессом нашла теоретическое обоснование в модели «Подготовленность – усталость» (FFM) Э. Банис-тера [8], связывающей спортивные результаты с тренировочным профилем. Её практической адаптацией стала



модель «парадокса предотвращения травм на тренировках» (“Training-Injury Prevention Paradox model”), предложенная Т. Габбетом [9]. Результаты исследований было показано, что бесконтактные травмы ассоциируются не с тренировкой как таковой, а с неподходящей спортсмену программой тренировок, в частности с чрезмерным и быстрым повышением нагрузки. Парадокс, по мнению автора, заключался в том, что спортсмены, привыкшие к высоким тренировочным нагрузкам, получают меньше травм, чем спортсмены, тренирующиеся с меньшими нагрузками. В качестве ключевой переменной вводился показатель ACWR (Acute: Chronic Workload Ratio) – соотношение между краткосрочной «острой» и долгосрочной «хронической» нагрузкой как предиктор травм, связанных с тренировками. Несмотря на поддержку [5, 7, 10, 11], по мере накопления эмпирических данных и углубления методологического анализа модель столкнулась с серьезной критикой [12, 13, 14, 15, 16], став предметом активных дискуссий. Обзор современных публикаций, посвященных мониторингу тренировочной нагрузки и риску травматизма, выявляет также отсутствие терминологического консенсуса относительно методологического статуса ACWR: в научной литературе он позиционируется как модель (model), метод (method), подход (approach), концепция (concept) или показатель/индекс (ratio/measure) [1, 9–12, 14, 17–19]. Это связано с эволюцией понятия, различными интерпретациями исследователей и контекстом использования, а также с формальным отсутствием единого строгого определения в какой-либо из авторитетных ключевых научных работ, что привело к некоторому «терминологическому дрейфу». Представляется, что термин «подход» более точно отражает комплексный характер рассматриваемого явления, выходящего за рамки простого расчета конкретного изолированного показателя (ratio). Подход включает в себя методологию сбора данных о тренировочной нагрузке, спектр методов агрегации временных рядов, принципы интерпретации полученных значений, практические решения по интеграции данных в тренировочный процесс, теоретическое обоснование, а также продолжающиеся научные дискуссии вокруг его валидности, ограничений и дальнейшего развития. В проводимом обзоре терминология контекстуально уточняется: ACWR как показатель используется, когда речь идет о методах расчета, ACWR-подход – при описании общей концепции и использования ACWR в рамках комплексной стратегии для снижения риска неконтактных травм и срыва адаптации.

Цель работы – выявление и систематизация основных направлений критики ACWR-подхода, его ключевых ограничений, а также анализ современных инновационных модификаций, направленных на повышение его научной обоснованности и практической применимости.

Методы исследования

Поиск релевантных публикаций (оригинальных исследований, обзоров, мета-анализов) проводился в мае – июле 2025 г. в базах PubMed, Google Scholar, Europe PMC, ScienceDirect по комбинациям ключевых слов:

“ACWR”, “acute chronic workload ratio”, “fitness-fatigue model”, “training load”, “internal and external load”, “injury risk”, “injury prediction”, “athlete monitoring”, “EWMA”, “nonlinear adaptation”, “modification”, “AI in sports science”, “machine learning”, “critical review ACWR”, “Gabbett”, “Impellizzeri”, “Lolli”, “Busso”, “Hulin”, “Williams”. В число потенциальных для включения в обзор входили источники, опубликованные в период с середины 1970-х гг. (модель Банистера) по июль 2025 г., с фокусом на критические работы 2010–2025 гг. и методологические исследования 2018–2025 гг. Критерии отбора включали: релевантность трансформации FFM/ACWR; критический анализ ограничений ACWR и предложение конкретных модификаций. Анализ охватывал обобщение критики, систематизацию модификаций и прогностических моделей.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного по ключевым словам поиска было идентифицировано 707 релевантных источников. После дедупликации, скрининга по заголовкам и аннотациям, оценки доступности полнотекстовых версий и соответствия критериям включения, проведенных с использованием программного обеспечения EndNote, 41 источник был включен в обзор. Ключевые аспекты анализа: историко-концептуальный (эволюция подхода); критико-методологический (систематизация ограничений); модификационно-прикладной (анализ направлений совершенствования); перспективный (тенденции развития). Особое внимание уделено конструктивным путям преодоления выявленных ограничений.

Базовые концепции и основы классического ACWR-подхода

Концепция “Fitness-Fatigue”, связывающая «дозу» нагрузки с адаптацией, легла в основу модели «импульс – отклик» Э. Банистера [8]. Она описывает уровень готовности (результативности) как разницу между долгосрочным положительным («фитнес») и краткосрочным отрицательным («усталость») компонентами. Несмотря на концептуальную привлекательность, практическое применение модели ограничивалось сложностью калибровки параметров и прогнозирования для отдельных спортсменов [20].

Значительный прорыв в практической реализации данного подхода к мониторингу нагрузки был связан с работами Т. Габбетта. Он обосновал модель, названную им «парадокс предотвращения травм на тренировках», ключевым элементом которой является определение соотношения между краткосрочной «острой» нагрузкой и долгосрочной «хронической» нагрузкой на основе расчета показателя ACWR – Acute: Chronic Workload Ratio [9]. В основу модели заложен простой принцип: «хроническая» нагрузка (рассчитанная как простое скользящее среднее – Rolling Average, RA) выступала суррогатом подготовленности, а «острая» нагрузка – индикатором усталости. Эмпирические исследования выявили U-образную зависимость риска травмы от ACWR с минимальным риском в «безопасной (оптимальной) зоне» (“sweet zone”, чаще всего 0.85–1.35) [9, 21]. Широкое



использование метрик sRPE, PlayerLoad и дистанции высокоинтенсивного бега (HSR) [22, 23], а также простота расчета на основе sRPE обеспечили модели популярность в игровых видах спорта. Стоит отметить, что термин «модель» имеет здесь не строго математический, а прикладной, методологический смысл – как система принципов и методов, объединенных общей идеей, и речь идет не о «модели ACWR», а скорее о «модели мониторинга нагрузки, использующей показатель ACWR в качестве ключевого метрического инструмента».

Критический анализ ограничений модели Т. Габбетта

Активное использование модели Т. Габбетта выявило комплекс существенных ограничений, ставших предметом обоснованной критики научного сообщества [12–15, 24]. К *методологическим недостаткам* относятся статистические артефакты (ratio bias) [12], жесткая фиксация временных окон (7–28 дней), произвольность выбора которых не учитывает вид спорта, специализацию спортсмена, его индивидуальные особенности, тип нагрузки, этап подготовки и другие факторы, обуславливающие вариативность адаптационных процессов [9, 25, 26]. Фокус преимущественно на механической нагрузке оставляет без внимания важные немеханические факторы риска, такие как психологический стресс, качество сна, нутритивный статус, состояние здоровья и история травм [12, 13, 27], а также игнорирует вариативность (монотонность) нагрузки внутри оцениваемого периода [28].

Математические ограничения включают линейность модели, придающую одинаковый вес всем нагрузкам вне зависимости от их временной близости, что противоречит представлению о большей значимости недавних стимулов [29], а также неспособность адекватно отражать нелинейный и индивидуально-специфичный характер адаптационных процессов. Модель также демонстрирует высокую чувствительность к пропускам данных и низким значениям хронической нагрузки [14, 30, 31].

Концептуальные ограничения охватывают сомнения в причинно-следственной природе выявленной U-образной зависимости, которая, по данным симуляционных исследований, может быть артефактом структуры данных и календаря соревнований [12, 26]. ACWR выявляет ассоциацию паттернов нагрузки с риском, но не является доказательством причинности [15]. Проблема «замороженного» знаменателя при использовании RA [16], игнорирование кумулятивного стресса, отсутствие адаптации к индивидуальным реакциям, слабая предсказательная сила на индивидуальном уровне [12, 32] и статичность в динамичной среде [5] также входят в этот перечень. Упрощенное представление нагрузки единым интегральным показателем маскирует качественные различия в ее типах [12], а предположение о единой статичной «безопасной» (оптимальной) зоне не учитывает зависимость риска от абсолютного уровня нагрузки, вида спорта, периода подготовки, возраста и пола спортсмена [24].

Отмечались также потенциальные сложности при практическом использовании модели в тренировочном процессе, в частности, связанные с зависимостью значе-

ний ACWR от выбранной метрики нагрузки [33], с проблемой интерпретации при возвращении спортсмена к тренировкам после отдыха или травмы [34]. Важно отметить, что сам Т. Габбетт предостерегал против догматического применения фиксированных параметров без учета контекста и индивидуальных реакций, подчеркивая, что ACWR – это инструмент для информированного анализа в комплексе с другими данными и профессиональным суждением тренера, а не жесткий алгоритм [24].

Основные направления модификации и совершенствования ACWR-подхода

Столь серьезная и обоснованная критика, однако, не привела к отказу от концепции «баланса нагрузки», а напротив, стала импульсом для её конструктивной трансформации. Осознание ограничений стимулировало активный поиск путей модификации, направленных на повышение точности, индивидуальной релевантности и практической полезности самого подхода к мониторингу нагрузки на основе ACWR, что реализуется через несколько взаимосвязанных направлений развития и модификации.

Фундаментальным направлением совершенствования является *уточнение и объективизация самих показателей нагрузки*. Использование более специфичных объективных метрик, таких как данные GPS, акселерометрии, измерителей мощности, показателей ударной нагрузки и метаболических затрат, позволяет точнее дифференцировать направленность тренировочного воздействия. Перспективным представляется и учет немеханических факторов, например, путем включения дифференцированных шкал RPE (раздельно оценивающих физическую, когнитивную и эмоциональную нагрузку) и систематического мониторинга wellness-параметров, значимо коррелирующих с маркерами усталости [27].

Оптимизация методов расчета временных окон и усреднения нагрузки представляет собой второе ключевое направление. Исследователи активно экспериментируют с продолжительностью острых (3, 5, 7 дней) и хронических (14, 21, 28, 35 дней) периодов, отходя от жесткой схемы 7:28 дней. Особое признание получило применение экспоненциально взвешенных скользящих средних (EWMA) вместо простого скользящего среднего (SMA). Метод EWMA методологически более обоснован, более чувствителен к изменениям, придает больший вес недавним данным, что адекватнее отражает текущее состояние спортсмена и динамику адаптационных процессов [16, 29].

Персонализация параметров формирует третье важное направление развития. Это подразумевает отказ от универсальных «безопасных» зон и фиксированных временных окон в пользу их динамической настройки на основе долгосрочного мониторинга индивидуальных реакций спортсмена [21]. Такой подход напрямую отвечает на критику, связанную с игнорированием нелинейности адаптации и индивидуальных различий. Разрабатываются методы адаптации пороговых значений ACWR с учетом индивидуальной истории спортсмена (включая перенесенные травмы). Важным аспектом персонали-



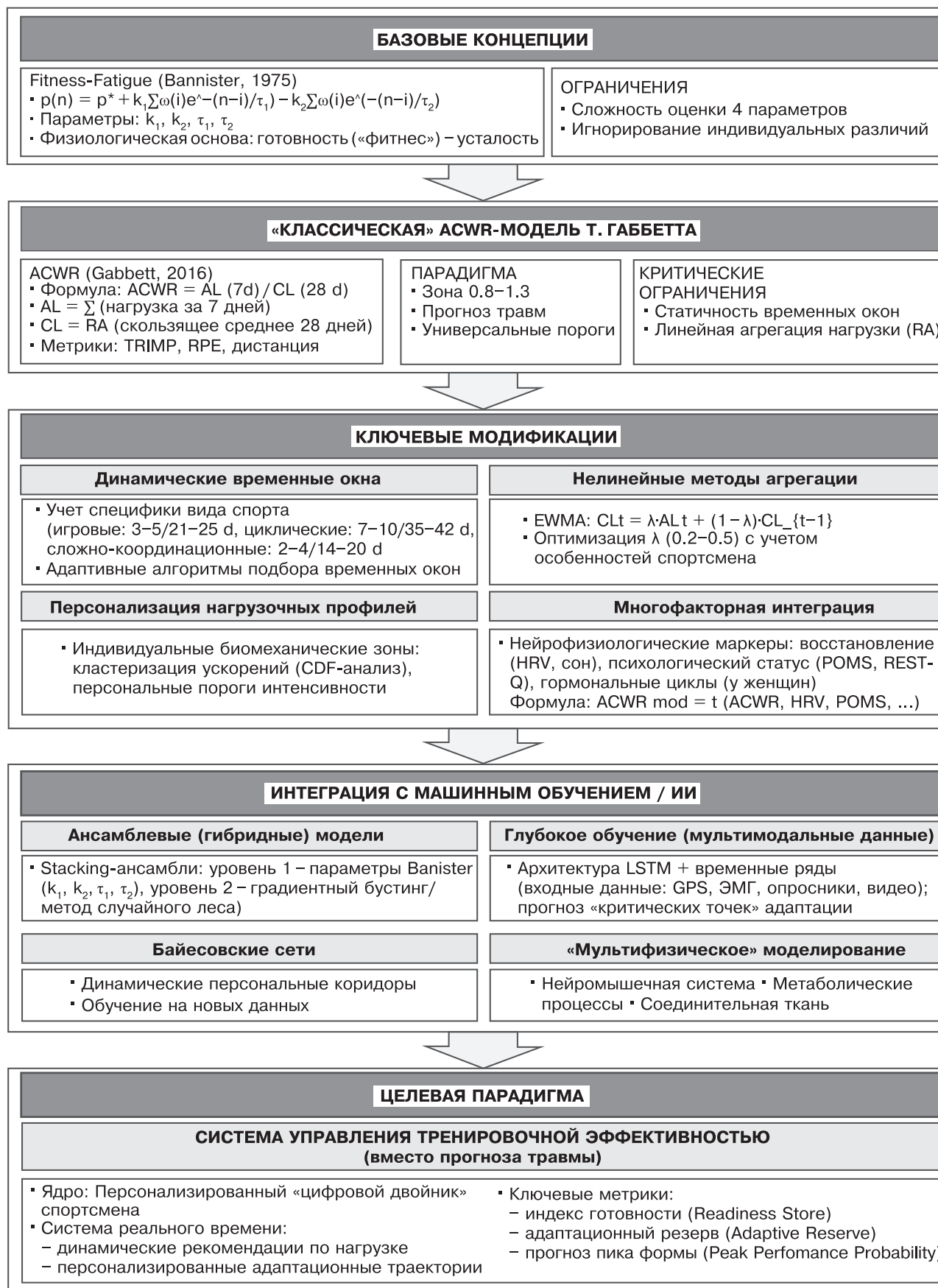


Рис. 1. Концептуальная схема трансформации ACWR-подхода



зации становится *комбинирование ACWR с данными о текущем состоянии организма*, такими как показатели готовности к нагрузке (опросники восстановления и настроения), оценка вариабельности сердечного ритма (BCR) и биохимические маркеры стресса и восстановления, что позволяет получить более целостную картину [35, 36].

Дифференциация учета типа нагрузки и ее абсолютно-го уровня выступает четвертым направлением модификаций. Исследователи предлагают рассчитывать отдельные соотношения ACWR для различных компонентов нагрузки (например, общий объем, высокоинтенсивная работа, спринтерские усилия, ударные воздействия), что позволяет выявить специфические риски, маскируемые суммарным показателем [37]. Стратификация риска и оценка тренировочного статуса дополнительно улучшаются за счет интеграции анализа соотношения ACWR и абсолютной величины хронической нагрузки.

Новые возможности открывает *внедрение статистических усовершенствований и методов машинного обучения (МО)*. Алгоритмы искусственного интеллекта и МО активно применяются для оптимизации параметров ACWR, анализа сложных многомерных взаимодействий и создания адаптивных систем поддержки принятия решений в реальном времени [38–42]. Использование байесовских подходов, обеспечивающих не просто расчет соотношения, а получение вероятностных оценок риска с их обновлением по мере получения новых данных, и алгоритмов МО способствует выявлению нелинейных зависимостей, построению индивидуальных прогнозных моделей травматизма и производительности, а также персонализации пороговых значений ACWR [35]. Современные подходы, включая EWMA, дифференцирование типов нагрузки, интеграцию с маркерами функционального состояния организма спортсмена и применение МО, позволяют преодолеть ограничения исходного упрощенного подхода, прежде всего, путем учета нелинейности адаптационных процессов и индивидуальной вариабельности ответа на нагрузку [16, 35, 43].

Параллельно с техническими усовершенствованиями наблюдается *значительный сдвиг акцента в целевой направленности мониторинга нагрузки с ACWR-подходом*: от преимущественной задачи прогнозирования травматизма к максимизации спортивной производительности и оптимизации адаптационного потенциала спортсмена [2, 5, 10]. Целью становится не просто избегание «красных зон» ACWR, а определение индивидуальной «оптимальной зоны», которая для конкретного спортсмена наилучшим образом стимулирует положительные адаптации, способствуя росту результативности с учетом уникального соотношения его физиологических и психологических характеристик. Истинная ценность эволюционирующего ACWR-подхода заключается в обеспечении понимания взаимосвязи параметров нагрузки, уровня подготовленности, функционального и психоэмоционального состояния спортсмена, а также в выявлении периодов, когда эта взаимосвязь отклоняется от ожидаемой или планируемой

[44]. Результаты проведенного анализа и обобщения отражены на рис. 1. Схема структурирована по четырем уровням (исторические основы с конкретными формулами и ограничениями, современные модификации с основными техническими деталями, перспективные методы машинного обучения и целевая парадигма, отражающая переход к системе управления эффективным тренировочным процессом) и позволяет проследить историческую преемственность и техническую эволюцию, подчеркнуть комплексность подхода и практическую направленность его развития. Фундаментальная идея, лежащая в основе ACWR-подхода – критическая важность баланса между недавней нагрузкой и долгосрочным «тренировочным фоном» – доказала свою концептуальную ценность. Подход продолжает активно эволюционировать, адаптируясь к новым научным данным и практическим запросам, трансформируясь из относительно простого индикатора риска травм в часть комплексного гибкого инструмента управления тренировочным процессом.

Выводы

Результаты аналитического обзора подтверждают, что, несмотря на существенные и методологически обоснованные критические замечания в адрес классического ACWR-подхода, сама концепция баланса острой и хронической нагрузки сохраняет фундаментальное значение для спортивной науки и практики. Критика, включая фундаментальные работы о нелинейности адаптации, выступает драйвером необходимой конструктивной эволюции подхода, и наблюдаемое разнообразие терминологии вокруг ACWR отражает эту эволюцию: от простого показателя до элемента комплексных систем мониторинга нагрузки.

Выявленные методологические ограничения «классического» ACWR-подхода принципиально преодолимы благодаря активным разработкам по его совершенствованию, ключевые направления которых (нелинейные методы агрегации, динамические временные окна, персонализация нагрузочных профилей, многофакторная интеграция, применение методов машинного обучения) подробно рассмотрены в обзоре. Перспективы ACWR-подхода заключаются в его трансформации в гибкий, адаптивный и интегрированный элемент современных наукоёмких систем управления тренировочным процессом. Дальнейший прогресс определяется способностью интегрировать достижения спортивной науки, спортивной медицины и передовых технологий, а успешное практическое применение требует высокой квалификации специалистов, их глубокого понимания лежащих в основе концепций и ограничений, а также готовности к комплексному анализу данных в контексте конкретной спортивной ситуации и индивидуальных особенностей спортсмена.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУ ФНЦ ВНИИФК
№ 777-00001-25 (тема № 001-25/3)



Литература/References

1. Gabbett T.J., Oetter E. From Tissue to System: What Constitutes an Appropriate Response to Loading? // *Sports Med.* – 2025. – Vol. 55. – Pp. 17–35. – doi.org/10.1007/s40279-024-02126-w
2. Foster C., Rodriguez-Marroyo J.A., de Koning J.J. Monitoring Training Loads: The Past, the Present, and the Future // *Int. J. Sports Physiol. Perform.* – 2017. – Vol. 12 (Suppl. 2). – Pp. S222–S229.
3. West S., Shrier I., Impellizzeri F.M., Clubb J., Ward P., Bullock G. Training-Load Management Ambiguities and Weak Logic: Creating Potential Consequences in Sport Training and Performance // *International Journal of Sports Physiology and Performance.* – 2025. – Vol. 20 (3). – Pp. 481–484. – DOI:10.1123/ijssp.2024-0158
4. Dhahbi W., Chaabene H., Pyne D.B., Chamari K. Standardizing the Quantification of External Load Across Different Training Modalities: A Critical Need in Sport-Science Research // *International Journal of Sports Physiology and Performance.* – 2024. – Vol. 19 (11). – Pp. 1173–1175.
5. Bourdon P.C., Cardinale M., Murray A. et al. Monitoring Athlete Training Loads: Consensus Statement // *Int. J. Sports Physiol. Perform.* – 2017. – Vol. 12 (Suppl. 2). – Pp. S2161–S2170.
6. Haddad M., Stylianides G., Djaoui L., Dellal A., Chamari K. Session-RPE method for training load monitoring: validity, ecological usefulness, and influencing factors // *Front Neurosci.* – 2017. – Vol. 11. – P. 612.
7. Myers N.L., Mexicano G., Aguilar K.V. The Association Between Noncontact Injuries and the Acute-Chronic Workload Ratio in Elite-Level Athletes: A Critically Appraised Topic // *J. of Sport Rehab.* – 2020. – Vol. 29 (1). – Pp. 127–130.
8. Banister E.W., Calvert T.W., Savage M.V., Bach T. A systems model of training for athletic performance // *Aust. J. Sports Med.* – 1975. – Vol. 7. – Pp. 57–61.
9. Gabbett T.J. The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? // *British Journal of Sports Medicine.* – 2016. – Vol. 50 (5). – Pp. 273–280.
10. Soligard T., Schweltnus M., Alonso J.M. et al. How much is too much? (Part 1) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of injury // *British Journal of Sports Medicine.* – 2016. – Vol. 50 (17). – Pp. 1030–1041.
11. Verhagen E., van Dyk N., Clark N., Shrier I. Do not throw the baby out with the bathwater; screening can identify meaningful risk factors for sports injuries // *British Journal of Sports Medicine.* – 2018. – Vol. 52 (19). – Pp. 1223–1224.
12. Impellizzeri F.M., Tenan M.S., Kempton T., Novak A., Coutts A.J. Acute: Chronic Workload Ratio: Conceptual Issues and Fundamental Pitfalls // *International Journal of Sports Physiology and Performance.* – 2020. – Vol. 15 (6). – Pp. 907–913. – DOI:10.1123/ijssp.2019-0864
13. Impellizzeri F.M., Shrier I., McLaren S.J. et al. Understanding Training Load as Exposure and Dose // *Sports Med.* – 2023. – Vol. 53. – Pp. 1667–1679. – doi.org/10.1007/s40279-023-01833-0
14. Wang C., Vargas J.T., Stokes T. et al. Statistical flaws in the calculation of the Acute: Chronic Workload Ratio // *International Journal of Sports Physiology and Performance.* – 2020. – Vol. 15 (7). – Pp. 1011–1015.
15. Lolli L., Batterham A.M., Hawkins R. et al. Mathematical coupling causes spurious correlation within the conventional acute-to-chronic workload ratio calculations // *British Journal of Sports Medicine.* – 2019 Aug. – Vol. 53 (15). – Pp. 921–922. – DOI: 10.1136/bjsports-2017-098110
16. Murray N.B., Gabbett T.J., Townshend A.D., Blanch P. Calculating acute:chronic workload ratios using exponentially weighted moving averages provides a more sensitive indicator of injury likelihood than rolling averages // *British Journal of Sports Medicine.* – 2017. – Vol. 51 (9). – Pp. 749–754.
17. Zouhal H., Boullosa D., Ramirez-Campillo R., Ali A., Granacher U. Editorial: Acute: Chronic Workload Ratio: Is There Scientific Evidence? // *Front Physiol.* – 2021. – Vol. 7 (12). – P. 669687. – DOI: 10.3389/fphys.2021.669687
18. Maupin D., Schram B., Canetti E., Orr R. The Relationship Between Acute: Chronic Workload Ratios and Injury Risk in Sports: A Systematic Review // *Open Access J. Sports Med.* – 2020 Feb. – Vol. 24 (11). – Pp. 51–75. – DOI: 10.2147/OAJSM.S231405
19. Andrade R., Wik E.H., Rebelo-Marques A., Blanch P. et al. Is the Acute: Chronic Workload Ratio (ACWR) Associated with Risk of Time-Loss Injury in Professional Team Sports? A Systematic Review of Methodology, Variables and Injury Risk in Practical Situations // *Sports Med.* – 2020 Sep. – Vol. 50 (9). – Pp. 1613–1635.
20. Busso T. Variable dose-response relationship between exercise training and performance // *Med. Sci. Sports Exerc.* – 2003. – Vol. 35 (7). – Pp. 1188–1195.
21. Hulin B.T., Gabbett T.J., Lawson D.W. et al. The Acute: Chronic Workload Ratio predicts injury: high chronic workload may decrease injury risk in elite rugby league players // *British Journal of Sports Medicine.* – 2016. – Vol. 50 (4). – Pp. 231–236.
22. Halson S.L. Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes // *Sports Med.* – 2014. – Vol. 44 (Suppl. 2). – Pp. S139–S147.
23. Scott B.R., Lockie R.G., Knight T.J. et al. A comparison of methods to quantify the in-season training load of professional soccer players // *Int. J. Sports Physiol. Perform.* – 2013. – Vol. 8 (2). – Pp. 195–202.
24. Gabbett T.J. Debunking the myths about training load, injury and performance: empirical evidence, hot topics and recommendations for practitioners // *British Journal of Sports Medicine.* – 2020. – Vol. 54 (1). – Pp. 58–66.
25. Carey D.L., Blanch P., Ong K.L. et al. Training loads and injury risk in Australian cricket: fast bowlers // *Int. J. Sports Physiol. Perform.* – 2017. – Vol. 12 (Suppl. 2). – Pp. S269–S274.
26. Griffin A., Kenny I.C., Comyns T.M., Lyons M. The Association Between Acute: Chronic Workload Ratio and Injury and its Application in Team Sports: A Systematic Review // *Sports Med.* – 2020. – Vol. 50 (3). – Pp. 561–580.



27. Saw A.E., Main L.C., Gastin P.B. Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review // *British Journal of Sports Medicine*. – 2016. – Vol. 50 (5). – Pp. 281–291.
28. Colby M.J., Dawson B., Heasman J. et al. Accelerometer and GPS-derived running loads and injury risk in elite Australian footballers // *J. Strength Cond. Res.* – 2014. – Vol. 28 (8). – Pp. 2244–2252.
29. Williams S., West S., Cross M.J., Stokes K.A. Better way to determine the Acute: Chronic Workload Ratio? // *British Journal of Sports Medicine*. – 2017. – Vol. 51 (3). – Pp. 209–210.
30. Rossi A., Pappalardo L., Cintia P. Effective injury forecasting in soccer with GPS training data and machine learning // *PLoS One*. – 2018. – Vol. 13 (7). – P. e0201264.
31. Busso T., Chalencon S. Validity and Accuracy of Impulse-Response Models for Modeling and Predicting Training Effects on Performance of Swimmers // *Med. Sci. Sports Exerc.* – 2023 Jul 1. – Vol. 55 (7). – Pp. 1274–1285.
32. Bittencourt N.F.N., Meeuwisse W.H., Mendonça L.D. et al. Complex systems approach for sports injuries: moving from risk factor identification to injury pattern recognition-narrative review and new concept // *British Journal of Sports Medicine*. – 2016. – Vol. 50 (24). – Pp. 1309–1314.
33. Akenhead R., Nassis G.P. Training Load and Player Monitoring in High-Level Football: Current Practice and Perceptions // *Int. J. Sports Physiol. Perform.* – 2016. – Vol. 11 (5). – Pp. 587–593.
34. Blanch P., Gabbett T.J. Has the athlete trained enough to return to play safely? The Acute: Chronic Workload Ratio permits clinicians to quantify a player's risk of subsequent injury // *British Journal of Sports Medicine*. – 2016. – Vol. 50 (8). – Pp. 471–475.
35. Staunton C.A., Abt G., Weaving D., Wunderlich D.W.T. Misuse of the term 'load' in sport and exercise science // *J. Sci. Med. Sport.* – 2022 May. – Vol. 25 (5). – Pp. 439–444.
36. Weaving D., Jones B., Marshall P. et al. The case for adopting a multivariate approach to optimize training load quantification in team sports // *Front Physiol.* – 2022. – Vol. 13. – P. 832247.
37. Bowen L., Gross A.S., Gimpel M., Li F.X. Accumulated workloads and the Acute: Chronic Workload Ratio relate to injury risk in elite youth football players // *British Journal of Sports Medicine*. – 2017. – Vol. 51 (5). – Pp. 452–459.
38. Claudino J.G., Capanema D.O., de Souza T.V. et al. Current Approaches to the Use of Artificial Intelligence for Injury Risk Assessment and Performance Prediction in Team Sports: a Systematic Review // *Sports Med. Open.* – 2019. – Vol. 5 (1). – P. 28.
39. Heidari J., Beckmann J., Bertollo M. et al. Multidimensional monitoring of recovery status and implications for performance // *Int. J. Sports Physiol. Perform.* – 2019. – Vol. 14 (1). – Pp. 2–8.
40. Rommers N., Rössler R., Verhagen E. et al. A machine learning approach to assess injury risk in elite youth football players // *Med. Sci. Sports Exerc.* – 2020. – Vol. 52 (8). – Pp. 1745–1751.
41. Rossi A., Pappalardo L., Cintia P. A narrative review for a machine learning application in sports: an example based on injury forecasting in soccer // *Sports*. – 2022. – Vol. 10 (1). – P. 5.
42. Juginovic A., Kekic A., Aranza I. et al. Next-Generation Approaches in Sports Medicine: The Role of Genetics, Omics, and Digital Health in Optimizing Athlete Performance and Longevity – A Narrative Review // *Life*. – 2025. – Vol. 15. – P. 1023.
43. Imbach F., Sutton-Charani N., Montmain J. et al. The Use of Fitness-Fatigue Models for Sport Performance Modelling: Conceptual Issues and Contributions from Machine-Learning // *Sports Med.* – 2022. – Vol. 8. – P. 29.
44. Vermeire K., Ghijs M., Bourgois J.G., Boone J. The Fitness-Fatigue Model: What's in the Numbers? // *International Journal of Sports Physiology and Performance*. – 2022. – Vol. 17 (5). – Pp. 810–813.

