 © Авторы статьи / Authors of the article

БИОХИМИЯ/BIOCHEMISTRY

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.74 EDN: FYYYFX

МЕТАБОЛИТЫ ОБМЕНА АМИНОКИСЛОТ И ГОРМОНОВ КАК МАРКЕРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРЕНИРОВОК У ДЕТЕЙ-СПОРТСМЕНОВ

Обзор

Мурач Е.И.[1, *], Анашкина А.А.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-8472-5820;
[2] ORCID : 0000-0002-6013-8744;
[1, 2] Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (elena_murach[at]mail.ru)

Предложена: 15.12.2025; Принята: 23.04.2026; Опубликована: 18.05.2026

Аннотация

Проанализированы современные исследования ключевых метаболитов аминокислотного и гормонального обменов, играющих роль важных биомаркеров эффективности тренировочных процессов у юных спортсменов. Изучение динамики концентраций важнейших аминокислот (таких как фенилаланин, глутамат, глутамин, карнозин) и гормональных показателей (включая тестостерон, кортизол, катехоламины) позволяет оценивать метаболические изменения и адаптационные возможности детского организма к физическим нагрузкам. Однако внедрение этих биомаркеров сопряжено с методологическими трудностями, а классическое соотношение тестостерон/кортизол у подростков в пубертатный период демонстрирует низкую специфичность из-за эндогенных гормональных колебаний. Анализ специализированной научной литературы подчеркивает необходимость внедрения комплексных подходов к мониторингу маркеров обмена веществ у молодых спортсменов, включая создание специализированных диагностических панелей и стандартов контроля, адаптированных к возрастным особенностям и уровням спортивной подготовленности детей. Это позволит оптимизировать тренировки, повысить эффективность спортивных достижений и минимизировать риски травматизации и развития метаболических расстройств среди подрастающего поколения спортсменов.

Ключевые слова: биомаркеры эффективности тренировок, аминокислоты при физических нагрузках, гормоны у подростков-спортсменов, метаболом спортсменов.

METABOLITES OF AMINO ACID AND HORMONE METABOLISM AS MARKERS OF TRAINING EFFECTIVENESS IN CHILD ATHLETES

Review article

Murach E.I.[1, *], Anashkina A.A.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-8472-5820;
[2] ORCID : 0000-0002-6013-8744;
[1, 2] Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

* Corresponding author (elena_murach[at]mail.ru)

Suggested: 15.12.2025; Accepted: 23.04.2026; Published: 18.05.2026

Abstract

Modern studies of key metabolites of amino acid and hormonal metabolism, which serve as important biomarkers of the effectiveness of training processes in young athletes, have been analysed. Studying the dynamics of concentrations of key amino acids (such as phenylalanine, glutamate, glutamine and carnosine) and hormonal indicators (including testosterone, cortisol and catecholamines) allows for the evaluation of metabolic changes and the adaptive capacity of a child's body to physical exertion. However, the implementation of these biomarkers is associated with methodological difficulties, and the classic testosterone/cortisol ratio in teenagers during puberty demonstrates low specificity due to endogenous hormonal fluctuations. An analysis of the specialist scientific literature highlights the need to adopt complex approaches to monitoring metabolic markers in young athletes, including the development of specialised diagnostic panels and control standards adapted to the age-specific characteristics and levels of athletic fitness of children. This will enable the optimisation of training, improve the effectiveness of sporting performance, and minimise the risks of injury and the development of metabolic disorders among the younger generation of athletes.

Keywords: biomarkers of training effectiveness, amino acids during physical exercise, hormones in teenage athletes, athletes' metabolome.

Введение

Физические упражнения являются полезными не только для физического, но и психического здоровья, поэтому в современном обществе, где остро стоит вопрос о гармоничном развитии современных детей и подростков, крайне актуальны метаболомные исследования, которые позволяют изучить влияние физических упражнений на организм путём анализа метаболитов, выделяемых такими тканями, как скелетные мышцы, кости и печень [1], [2], [3], [4]. Изучение метаболитов, вырабатываемых при физических нагрузках, является развивающейся областью, а дальнейшие

 © Авторы статьи / Authors of the article

исследования могут выявить основные метаболические механизмы и помочь разработать программы тренировок для укрепления здоровья, увеличения работоспособности и качества жизни [5], [6], [7], [8].

Стоит отметить, что многообразие видов тренировок и их интенсивность приводит к разнообразным метаболическим ответам. Так, тренировки на выносливость увеличивают количество митохондрий и окислительных ферментов, а тренировки с отягощениями (или упражнения на силу) увеличивают количество мышечных волокон и гликолитических ферментов [9]. Вместе с тем именно кратковременные тренировки на выносливость влияют на метаболизм аминокислот, липидов, энергетический обмен, метаболизм кофакторов, витаминов и даже нуклеотидов. Систематические же упражнения на выносливость способны улучшать липидный метаболизм и изменяют метаболизм аминокислот [10]. Кратковременные упражнения на силу изменяют несколько метаболических путей, включая анаэробные процессы (в первую очередь анаэробный гликолиз, активируя катаболизм углеводов), что приводит к адаптации скелетных мышц. Комбинированные упражнения на выносливость и силу влияют на активность всех метаболических процессов — липидного, углеводного метаболизма и обмена аминокислот, повышая анаэробную метаболическую способность и устойчивость к утомлению за счет аэробных процессов [11], [12].

Наука о биомаркерах крови в элитном и профессиональном спорте быстро развивается и может предоставить объективные данные междисциплинарной команде специалистов в области спортивной науки и медицины для поддержания здоровья, при разработке рационов питания и программ по повышению результативности спортсменов в широком спектре физиологических систем [13], [14], [15]. Ряд биомаркеров может предоставить информацию, относящуюся к готовности спортсмена к тренировкам [16], [17], [18], [19].

Изучение метаболического ответа организма на физические нагрузки помогает решению и новых вопросов в спортивной науке. Получая количественную информацию о метаболических профилях, связанных с определенным типом физической нагрузки, можно выявить биомаркеры, которые отражают производительность мышц, или потенциально связанные со спортивными травмами [20]. Также подобные исследования могут дать лучшее понимание механизмов интеграции реакций метаболизма организма человека в единую систему [21], [22].

В целом, если рассматривать критерии выносливости в современном спорте, то на физическую работоспособность могут влиять пол [17], возраст [23], образ жизни и индекс массы тела (ИМТ) [24], [25], а также физиологические (например, мышечная сила, уровень адаптации к гипоксии) и морфологические (например, процентное содержание жира в организме, мышечная масса) характеристики человека [26], [27]. Однако количество упражнений, оптимальное для человека определенного возраста, пола, уровня развития, пубертатного периода остается неизвестным из-за отсутствия точных данных о молекулярных механизмах, лежащих в основе влияния физических упражнений на здоровье [28].

Недооценка тренером возрастных и индивидуальных морфофункциональных особенностей юных спортсменов нередко приводит к прекращению роста спортивных результатов, возникновению патологических состояний, а иногда, к инвалидности. Вместе с тем развитие современной медицины и диагностических систем, возможность комплексной оценки здоровья позволяют более детально изучить состояние здоровья детей [29], их морфофункциональный статус, метаболом, гармоничность развития. А значит, поможет снизить вероятность развития пограничных состояний и серьезных патологий.

Таким образом, проблема отбора и допуска детей к занятиям спортом была и остается одной из самых актуальных для разных видов спорта. Правильное ее решение обеспечивает развитие вида спорта и успехи спортсменов, и исследования метаболома в этом аспекте становятся все более актуальными.

Обмен аминокислот и карбоновых кислот при физических нагрузках

При характеристике различных режимов тренировок некоторые метаболические изменения можно наблюдать сразу после тренировки (например, лактат, инозинмонофосфат, фосфокреатин, креатин) [10], [30]. Данные изменения могут повлечь за собой изменения в других метаболитах.

Быстрое увеличение концентраций пирувата и лактата отражает анаэробную систему. Пируват является узловым метаболитом и связывает гликолиз, лактат, ацетил-КоА, щавелево-уксусную кислоту, яблочную кислоту и различные аминокислоты. Это промежуточный продукт, который играет ключевую роль в энергетическом обмене [31]. В результате физических нагрузок пируват может преобразовываться в лактат под воздействием лактатдегидрогеназы в ходе анаэробного гликолиза. Далее лактат может вступать в цикл Кори для утилизации в печени [32].

Также при избытке пирувата в мышцах при физических нагрузках в ходе трансаминирования синтезируется аланин. Аланин, попадая в кровь, транспортируется в печень, где вступает в глюкозо-аланиновый цикл. В ходе этого процесса аланин увеличился в 1,3 раза через 5 мин после нагрузки, даже при кратковременных упражнениях, поэтому он также является еще одним метаболитом быстрого реагирования [33]. Как правило, из-за повышенного энергетического обмена физические упражнения вызывают повышенное дезаминирование аминокислот, что приводит к усилению активности глюкозо-аланинового цикла [31]. Во время физической нагрузки уровень аммиака может повышаться в три-пять раз по сравнению с состоянием покоя [34]; это увеличение зависит от физической нагрузки и связано с ее интенсивностью [35], [36]. Истощение запасов гликогена увеличивает выработку аммиака и последующую аммонемию во время тренировки [20], [37].

При изучении метаболома спортсменов после аэробных интенсивных физических нагрузок было выявлено [38], что концентрация орнитина была повышена в группах нетренированных спортсменов, и, напротив, снижена в группах тренированных спортсменов. Авторы предполагают, что эти групповые различия объясняются увеличением количества и активности митохондрий в мышцах в группе тренированных, что соответствующим образом влияет на эффективность участия орнитина в цикле мочевины [39], [40].

В контексте физических упражнений лактат является наиболее часто измеряемым метаболитом, поскольку его концентрация при заданной интенсивности физических упражнений является показателем выносливости [41] и более

 © Авторы статьи / Authors of the article

тренированные спортсмены, при интенсивном беге, могли накопить больше лактата, что привело к более низкому образованию мочевины и более низким уровням орнитина в плазме, чем у нетренированных спортсменов. Лактат подавляет синтез мочевины на уровне аргинина. Таким образом, накопление лактата при интенсивных физических нагрузках приводило к снижению образования мочевины и снижению уровня орнитина в плазме крови тренированных спортсменов.

Аргинин играет важную роль во многих метаболических процессах: он участвует в синтезе креатина, аммиака, мочевины, оксида азота, входит в состав белка. Оксид азота способствуют расширению сосудов и усилению кровотока, что также важно для тренировки мышц [42].

Интересно, что орнитин, непротеиногенную аминокислоту, рассматривают не только как компонент орнитинового цикла. Есть данные о том, что аргинин и орнитин стимулируют секрецию гормона роста и инсулиноподобного фактора роста-1, что усиливает липолиз и окисление липидов, тем самым увеличивая расход энергии после тяжелых силовых упражнений [43]. Таким образом, вызванное физической нагрузкой увеличение циркулирующих аргинина и орнитина может способствовать улучшению функции сосудов и потере жира, связанной с физической нагрузкой. Следовательно, данные метаболиты могут стать перспективными маркерами эффективности тяжелых силовых упражнений [42].

Во время упражнений короткой продолжительности и высокой интенсивности у подростков-спортсменов происходит увеличение выработки аммиака в мышцах в результате дезаминирования аденозинмонофосфата и аминокислот с разветвленной цепью (изолейцина, лейцина и валина). Во многих исследованиях [44] также наблюдали снижение концентрации аминокислот с разветвлёнными боковыми цепями в плазме крови тренированных на выносливость мужчин с низким уровнем гликогена после 60-минутной езды на велосипеде. Подобные результаты можно объяснить тем, что у спортсменов-подростков отмечается преобладание аэробного метаболизма над анаэробным в первой половине пубертата. Это способствует высокой скорости восстановительных процессов при выполнении повторных интенсивных упражнений. Однако выполнение упражнений, в энергетическом обеспечении которых важен гликолиз, переносится подростками труднее [45]. У взрослых спортсменов подобные показатели наблюдаются при низком уровне потребления углеводов [46]. Снижение концентрации аминокислот с разветвлёнными боковыми цепями может быть связано с высокой потребностью в энергии и низким уровнем запасов гликогена в мышцах. Что приводит к потреблению аминокислот как источников энергии. Таким образом, синтез белка для восстановления мышц возможен только в том случае, если аминокислоты, используемые для выработки энергии, заменяются за счёт эндогенного метаболизма или потребления углеводов [47]. Восстановление нормальных соотношений аминокислот очень важно, в том числе, потому что аминокислоты с разветвлёнными боковыми цепями могут участвовать в передачи сигнала к белку mTOR (Mammalian target of rapamycin, мишень рапамицина у млекопитающих) и его каскадным мишеням такими как фосфорилированная киназа 70s6 p70s6k и белок 4e-bp1, связывающий эукариотический фактор инициации 4e. Они регулируют синтез белка и рост мышц и, со временем, могут привести к гипертрофии [48]. Таким образом, аминокислоты с разветвленными боковыми цепями могут быть использованы в мышцах в двух направлениях: либо в качестве источника энергии, либо как субстрат для синтеза белка. При физических нагрузках направление их использования зависит от потребности в энергии и её запасов [49]. Однако ряд исследователей [50] считают концепцию анаболического эффекта аминокислот необоснованной, поскольку процессы синтеза белка в мышечной ткани идут параллельно с его катаболизмом, усиливающимся при интенсивных физических нагрузках [51]. Возможно поэтому, изменения в содержании аминокислот с разветвлёнными боковыми цепями могут быть до определённой степени противоречивыми в различных исследованиях [52]. То есть уровень аминокислот может повышаться или понижаться в зависимости от вида спорта, физической нагрузки и интенсивности тренировок [51], [53].

При активных физических нагрузках так же увеличивается концентрация 2-оксоизокапроата, называемого 2-оксолейцином или кетолейцином, представляющего собой короткоцепочечную кетокислоту [54]. Наблюдаемое повышение уровня 2-оксоизокапроата может быть связано с деградацией лейцина, хотя его роль в физиологии физических тренировок остается неясной и требует дальнейшего изучения [55].

3-гидроксиизобутират является конечным продуктом распада валина [56] и, как и 2-оксоизокапроат, играет роль источника энергии.

α-кетобутират является метаболитом треонина, субстратом синтеза валина и изолейцина, а также субстратом комплекса ферментов альфа-кетодегидрогеназы с разветвленной цепью. При исследовании влияния постоянных физических нагрузок на здоровых молодых мужчин метаболомный анализ показал резкое снижение уровня а-кетобутирата, что, вероятно, связано с активацией мышечного комплекса альфа-кетодегидрогеназы с разветвленной цепью при физической нагрузке [42]. То есть данный метаболит может являться маркером усиленного катаболизма аминокислот с разветвленной цепью и потребления субстратов аминокислот с разветвленной цепью, что, вероятно, отражает повышенную окислительную эффективность мышц [57].

Аминокислоты с разветвлёнными боковыми цепями также действуют как доноры азота и углеродного скелета для синтеза других аминокислот (например, глутамина) [58].

Таким образом, вклад метаболизма аминокислот в энергоснабжение после сеанса нагрузок теоретически возможен. Однако необходимо провести дополнительные исследования, чтобы определить точную роль метаболизма аминокислот в энергоснабжении при нагрузках.

Фенилаланин является незаменимой аминокислотой и одной из крупнейших неполярных аминокислот, необходимых для синтеза белка [59]. Он через тирозин участвует в анаболизме катехоламинов, адреналина, норадреналина и дофамина, которые, в свою очередь, участвуют в регуляции метаболизма мышечной ткани [60]. Поскольку фенилаланин не окисляется и не синтезируется эндогенно, изменение концентрации указывает на изменение содержания белка: его синтез или деградацию. В исследованиях содержания фенилаланина после

 © Авторы статьи / Authors of the article

физических упражнений умеренной интенсивности показано, что уровень фенилаланина снижается в течение 1-часовой фазы восстановления после тренировки, и это может свидетельствовать об увеличении скорости распада белка в зависимости от физических нагрузок [61]. Безусловно, есть и другие незаменимые аминокислоты, которые участвуют в синтезе и катаболизме белка, однако они, в отличие от фенилаланина, подвержены окислению и могут быть использованы в качестве источника энергии (например, лейцин), что снижает их ценность как маркеров метаболизма белков [62], [63], [64]. Таким образом, фенилаланин является хорошим маркером протеолиза, поэтому его концентрация может отражать интенсивность обмена белка [61]. Это может объяснить повышенное содержание фенилпирувата (вырабатываемого из фенилаланина с помощью фенилаланин-трансаминазы), тирозина и префената (метаболита фенилаланина и тирозина) в плазме крови как маркеров протеолиза, вызванного физической нагрузкой, у людей, занимающихся физическими упражнениями.

Карнозин (дипептид, состоящий из остатков аминокислот β-аланина и гистидина) препятствует снижению pH во время интенсивных тренировок и, таким образом, повышает работоспособность спортсмена [65], [66]. В сыворотке крови и тканях карнозиназа-2 может расщеплять карнозин на β-аланин и L-гистидин, и её активность определяет содержание карнозина. После расщепления карнозина β-аланин и L-гистидин могут транспортироваться в клетки скелетных мышц. У спортсменов во время высокоинтенсивных физических нагрузок в исследованиях их метаболома было обнаружено повышение уровня гистидина и β-аланина, что, возможно, свидетельствует об увеличении распада карнозина в крови [65], [67], [68]. То есть определение уровня данных метаболитов карнозина, может быть маркером развития адаптации к кратковеменным интенсивным физическим нагрузкам [69], [70].

В исследованиях Saunders с соавторами (2017) наблюдается увеличение концентрации β-аланина и L-гистидина и, одновременно с этим, повышение физической работоспособности и производительности при продолжительности упражнений от 30 секунд до 10 минут [71]. Этот результат согласуется с действием карнозина в качестве буфера pH, поскольку накопление H+ с большей вероятностью способствует утомлению, чем при более короткой или продолжительной физической нагрузке. Оценка физической работоспособности (например, времени до истощения) показывает значительное повышение концентраций в крови продуктов метаболизма карнозина [72].

Во многих исследованиях было обнаружено, что деградация лейцина также увеличивает концентрацию α-кетоглутарата [73]. α-кетоглутарат является метаболитом цикла Кребса, а также он ускоряет восстановление мышц, стимулируя клетки-сателлиты мышц и поляризацию макрофагов, способствуя восстановлению мышц и уменьшая фиброз. Некоторые исследования, показывающие, что α-кетоглутарат способен предотвращать мышечную атрофию за счет усиления синтеза белка, ингибирования путей деградации и модулирования воспалительных реакций, что делает его актуальным при таких состояниях, как саркопения [74], кахексия и восстановление после травм [75], [76], [77], [78]. Для спортсменов и активных людей добавки с α-кетоглутаратом повышают выносливость, снижают утомляемость и способствуют более быстрому восстановлению после тренировок [79], [80], [81]. Поэтому накопление α-кетоглутаровой кислоты является метаболическим признаком эффективности силовых упражнений [82], [83]. Однако конкретных механизмов действия в литературе не описано. Требует дополнительного изучения взаимосвязь α-кетоглутарата с деградацией лейцина в энергоснабжении после сеанса нагрузок. Подобно распаду лейцина, распад валина также генерирует α-кетоглутарат, тем самым подкрепляя гипотезу о том, что распад аминокислот с разветвленной цепью может способствовать, по крайней мере, косвенно, снабжению энергией после интенсивных физических нагрузок.

Высвобождение аланина для стимулирования метаболизма аммиака, при интенсивных физических нагрузках вызывают умеренное повышение глутамата в скелетных мышцах [26]. Как важная малая молекула, глутамат играет ключевую роль во время силовых упражнений [82]. Глутамат после дезаминирования образует α-кетоглутарат. Глутаминовая кислота также является субстратом синтеза глутатиона при окислительном стрессе и иммунном ответе, и хорошо известным возбуждающим нейромедиатором в центральной нервной системе [84]. Повышение концентрации глутамата, вызванное интенсивными физическими нагрузками или упражнениями на выносливость, связывают как с повреждениями скелетных мышц, так и с реакцией на окислительный стресс.

В исследовании, проведенном Таулером и соавторами (2008) [85], которые изучали влияние тренировок на подростков-пловцов, уровень малонового диальдегида в плазме крови спортсменов существенно повышался, что говорит об окислительном повреждениим липидов. Знание о влиянии регулярных тренировок на окислительно-восстановительный статус юных спортсменов считается важным для их здоровья [86]. Как аэробные, так и анаэробные упражнения потенциально могут привести к увеличению выработки свободных радикалов, что может привести к острому окислительному стрессу [87]. Степень нарушения окислительно-восстановительного гомеостаза, зависит от многих факторов, в частности, от режима, интенсивности и продолжительности упражнений, уровня подготовки участника, пола возраста и привычек питания [88], [89].

Гомеостаз глутатиона играет важную роль в поддержании прооксидантно-антиоксидантного баланса. Он синтезируется в реакции глутамилового цикла. Важными ферментами этого процесса являются глутамилцистеинсинтетаза и глутатионсинтетаза. Более высокие уровни глутатиона, обнаруженные у спортсменов в состоянии покоя, по сравнению с нетренированными людьми, свидетельствуют о том, что регулярные физические нагрузки приводят к желаемой адаптации системы антиоксидантной защиты [90], [91].

Цистеин, глутаминовая кислота и пироглутаминовая кислота являются промежуточными звеньями глутамилового цикла. Таким образом, повышенный уровень глутамата при интенсивных физических нагрузках, а также снижение его уровня после тренировок [92] показывают, что интенсивные физические нагрузки влияют на глутамиловый цикл и указывают на степень развития окислительного стресса или адаптации к нему.

Также изменение содержания глутамата и его амида глутамина может быть использовано в качестве метода мониторинга состояний усталости у спортсменов [93], так как в исследованиях у спортсменов, испытывающих хроническую усталость, концентрация данных аминокислот в состоянии покоя значительно отличается от

 © Авторы статьи / Authors of the article

концентрации здоровых спортсменов высшей категории [94], а также перетренированности [95]. Таким образом, соотношение глутамата и глутамина демонстрирует перспективность для мониторинга тренировочного стресса [96], а значит требует более подробного изучения молекулярных механизмов.

Анализ уровня различных метаболитов, связанных с метаболизмом аминокислот, может дать оценку текущего физического состояния спортсменов, что может быть полезно для составления будущих тренировочных программ и предотвращения возможных расстройств, связанных с перетренированностью. Это особенно важно для растущего организма. Например, при разработке рациона питания необходимо учитывать не только потребности в пищевом белке, но и потребление энергии. Поскольку интенсивные физические нагрузки с высоким потреблением энергии могут привести к использованию белка и аминокислот в качестве субстратов для ее получения, а не для синтеза белка в процессе роста и развития, увеличения мышечной массы [97]. Вместе с тем при физических нагрузках увеличение скорости тока крови способствует большему поступлению аминокислот в мышцы, что снижает их повреждение и мышечную чувствительность замедленного типа, наступающую после интенсивной тренировки.

Однако изучение текущей литературы по поиску эффективных и показательных биомаркеров метаболических характеристик у юных спортсменов, а также, эффективности различных тренировок и перспектив спортивных достижений выявил пробелы в фактических данных для дальнейших исследований в развитии именно детского спорта.

Особый интерес для создания практических диагностических панелей, адаптированных для детей и подростков, представляют несколько групп метаболитов: карнозин и его метаболиты (β-аланин, гистидин), соотношение глутамат/глутамин, фенилаланин. Несмотря на выявленный потенциал, внедрение данных биомаркеров в реальную клинико-лабораторную практику для детского контингента сопряжено с рядом серьезных методологических трудностей. Основными препятствиями являются: отсутствие утвержденных возрастных и половых референсных интервалов (нормативов) с учетом стадии пубертата, сложность интерпретации результатов в динамике роста и созревания ребенка, а также инвазивность забора проб (например, для определения мышечного карнозина требуются биопсия или сложные протоколы МР-спектроскопии, что малоприменимо в рутинной практике).

Гормональный фон при физических нагрузках

С одной стороны, физическая активность повышает уровень некоторых гормонов, связанных с пубертатным развитием. С другой стороны, гормоны, которые выделяются во время физических упражнений, влияют на рост и развитие. Поэтому важна характеристика гормональных реакций на интенсивные физические нагрузки в юношеском возрасте для сохранения здоровья спортсмена и стабильного роста результатов [98]. Учитывая огромные гормональные изменения, происходящие в процессе роста и созревания подростков, можно предположить, что гормональная реакция на физические нагрузки не будет одинаковой у детей и подростков или молодежи разного возраста [99]. Таким образом, информация о влиянии тренировок различной интенсивности и действии физических нагрузок на гормональный фон юных спортсменов, может улучшить понимание долгосрочных последствий на здоровье и эффективность результатов.

Однако изучение механизма этих реакций проводится крайне мало, а значит, и профилактика этих нарушений затруднена.

Ранее уже отмечалось, что у детей в препубертатном возрасте преобладают аэробные способы получения энергии, и выявляется более низкая активность анаэробных процессов во время физической нагрузки. В связи с этим во время тяжелых физических нагрузок уровень лактата в мышцах и крови у детей ниже, чем у взрослых, и они в большей степени зависят от жирных кислот в качестве источника энергии. Это связано с тем, что у подростков препубертатного возраста может быть незрелая система регуляции уровня глюкозы. Однако относительная скорость окисления жирных кислот снижается по мере развития подросткового возраста в период полового созревания. Механизм ослабления утилизации липидов с наступлением полового созревания и влияние, которое это может оказать на состав тела, неизвестны. У подростков в препубертатном возрасте относительно высокий уровень окисления экзогенной глюкозы, возможно, из-за меньших запасов эндогенных углеводов [100].

Гормоны, связанные с пубертатным развитием, к которым относятся гормон роста (ГР), инсулиноподобный фактор роста (ИФР-1), половые стероиды и катехоламины, также являются гормонами, которые могут влиять на энергетический обмен во время физических упражнений. Считается, что повышение уровня половых стероидов препятствует действию инсулина на скелетные мышцы, жировую ткань и печень [98].

При выполнении физических упражнений также наблюдается небольшое, но значительное повышение уровня циркулирующего тестостерона у мальчиков-подростков [99]. Немногочисленные исследования групп молодых спортсменов показали, что силовые тренировки значительно повышали уровень тестостерона после тренировки, чего не наблюдалось после тренировок на выносливость. Т.е. уровень анаболических гормонов, таких как тестостерон, суперсемейство гормонов роста и катаболического гормона кортизола, повышается после тренировки с отягощениями. В то время как при тренировках с низкой интенсивностью, использующими длинные интервалы отдыха, активность этих гормонов существенно не меняется [101]. Подобные данные можно использовать в качестве маркеров, показывающих эффективность различных режимов физических нагрузок.

Тестостерон активирует анаболические и антикатаболические механизмы и, таким образом, участвует в росте мышечной ткани, восстановлении и ремоделировании, а также повышении производительности [102]. Многие исследования профессиональных спортсменов показали, что тестостерон является основным стимулятором роста мышц и последующего увеличения мышечной силы в ответ на силовые тренировки у мужчин [103]. Одной из возможных причин резкого повышения уровня тестостерона во время силовых упражнений является снижение его усвоения печенью, возможно, из-за снижения печеночного кровотока во время тренировки. Другая причина

 © Авторы статьи / Authors of the article

заключается в том, что прямая нервная стимуляция яичек во время стрессовых состояний приводит к высвобождению тестостерона [104].

Считается, что кортизол играет важную глюкокортикоидную роль во время длительных физических нагрузок, обеспечивая субстрат для катаболизма, но в случае кратковременных силовых упражнений кортизол может играть более важную роль в обеспечении аминокислотами для ремоделирования мышц. Это может быть одной из причин наблюдаемой взаимосвязи между повышением уровня кортизола, вызванным физической нагрузкой, и гипертрофией мышц, вызванной тренировкой [105], [106].

Литературные данные подтверждают, что тестостерон и кортизол могут регулировать долгосрочные изменения в росте мышц и спортивных результатах, особенно при тренировках с отягощениями [107]. Эти данные также подтверждают, что изменения в концентрации тестостерона или кортизола могут влиять на нервно-мышечную активность или поддерживать её с помощью различных краткосрочных механизмов (например, липидных/белковых путей, нейронной активности, поведения, когнитивных функций, работы двигательной системы, свойств мышц и энергетического обмена). Возможность двойного воздействия тестостерона и кортизола на нервно-мышечную систему предлагает новую парадигму для понимания эффективности тренировок с отягощениями и адаптации к ним [108]. Несколько факторов (например, структура тренировки, питание, генетика, статус и тип тренировок) могут резко изменить концентрацию тестостерона и/или кортизола и, тем самым, потенциально повлиять на эффективность тренировок с отягощениями и адаптивные результаты. Однако точный вклад этих эндогенных гормонов в тренировочный процесс все еще неясен.

Учитывая важность гонадостероидных и глюкокортикоидных гормонов для пластичности тканей и метаболизма подростков, у которых наблюдается активный анаболизм, требующий больших энергетических затрат, на удивление мало известно о скоординированной регуляции семейства гормональных промежуточных продуктов и основных гормонов в ответ на физическую нагрузку у юных спортсменов. Например, имеются исследования, показывающие, что при постоянных чрезмерных нагрузках на выносливость может возникать недостаточная обеспеченность энергией и гормональное подавление (гипогонадизм). Гипогонадизм был описан в ряде исследований [109], [110]. Такие тематические исследования позволяют получить представление о серьезных негативных последствиях неграмотно проведенных тренировок и распределенных физических нагрузок для эндокринной системы [111].

Физические нагрузки так же приводят к изменениям концентраций катехоламинов [51], таких как адреналин, норадреналин и дофамин, которые помогают увеличить частоту сердечных сокращений и сократительную способность сердца, а также регулируют обмен веществ и кровоток. Адреналин, норадреналин и дофамин при физических нагрузках повышаются за счет доминирования симпатической нервной системы в результате интенсивных физических упражнений [112]. Кратковременное повышение уровня катехоламинов имеет решающее значение для оптимальной выработки силы и высвобождения энергии во время силовых упражнений, так как ведет к повышению концентрации жирных кислот и глюкозы в крови. Однако у подростков предподросткового возраста уже наблюдается высокая аэробная работоспособность по сравнению со взрослыми, что связывают с тем, что физические упражнения стимулируют рост митохондрий [113]. Митохондрии адаптируются к метаболическому стрессу, вызванному определенными физическими нагрузками [114]. Высокоинтенсивные интервальные тренировки улучшают дыхательную функцию митохондрий [115], в то время как тренировки на выносливость увеличивают содержание митохондрий [39]. Однако эти исследования велись у спортсменов более старшего возраста, а, следовательно, нет никаких доказательств того, что содержание митохондрий изменяется в период полового созревания. Вместе с тем лишь немногие исследования проводились в этой области из-за необходимости проведения биопсии мышц.

Стоит отметить, что в ряде статей все перечисленные гормоны рассматриваются как маркеры синдрома перетренированности у спортсменов [116], [117].

Анализ литературы подчеркивает необходимость внедрения комплексных подходов к мониторингу маркеров обмена веществ у молодых спортсменов, включая создание специализированных диагностических панелей и стандартов контроля, адаптированных к возрастным особенностям и уровням спортивной подготовленности детей.

В этом контексте особого внимания требует оценка надежности классических гормональных маркеров. В частности, широко используемый у взрослых спортсменов показатель соотношения тестостерон/кортизол как маркер анаболического статуса и перетренированности у подростков в период пубертата демонстрирует низкую специфичность и надежность. Ввиду значительных эндогенных колебаний уровня половых стероидов и глюкокортикоидов в процессе созревания (периоды активного роста и полового развития), интерпретация изменений этого соотношения крайне затруднена. Повышение или понижение коэффициента может быть обусловлено не тренировочным стрессом, а естественными гормональными перестройками организма, что ограничивает его диагностическую ценность в педиатрической спортивной медицине и требует поиска альтернативных или дополнительных стабильных маркеров.

Тем не менее, индивидуальные гормональные профили могут быть использованы для более эффективного назначения силовых упражнений и программ тренировок или для оценки эффективности тренировки юных спортсменов. Также необходимо найти наиболее чувствительные маркеры быстрого изменения гормонального фона и, как следствие, результатов тренировок.

Заключение

Безусловно, все исследования в области влияния физических упражнений на метаболом спортсменов сходятся на том, что понимание этих механизмов может дать представление о фенотипических реакциях, позволить разработать персонализированные режимы тренировок, основанные на исходном метаболическом статусе человека.

Молодые спортсмены часто выводят себя за обычные рамки, выполняя длительные упражнения на выносливость, вызывая экстремальный метаболический стресс, что приводит к метаболическим изменениям, таким как накопление

 © Авторы статьи / Authors of the article

метаболитов энергетического обмена, истощение мышечного гликогена и окисление жиров. Однако в настоящее время данные о метаболических изменениях, происходящих во время физических нагрузок, представлены в основном по взрослым, натренированным спортсменам. Кроме того, исследования очень разрозненны, зачастую механизмы наблюдаемых изменений изучены недостаточно. Необходимы дальнейшие исследования для определения механизмов изменения метаболизма во время физических нагрузок у подростков в ходе взросления, роста мышц и развития опорно-двигательного аппарата. И, наконец, необходимо выяснить, вызывают ли длительные физические нагрузки средней интенсивности и тяжелые физические нагрузки в подростковом возрасте изменения на эндокринном и метаболическом уровнях [118].

В исследуемой литературе комплексный набор биомаркеров эффективности физических нагрузок и тренировок включает ключевые маркеры питания и метаболического здоровья, состояния гидратации, состояния мышц, выносливости, состояния и риска травм и воспаления [119]. В то время как исследования биохимических показателей у спортсменов выявили только отдельные биомаркеры для оценки здоровья, результатов и восстановления во время тренировок. Стоит отметить, что в литературе имеются противоречивые результаты по механизмам действия низкомолекулярных метаболитов, меняющихся при разных режимах нагрузок [47]. Вместе с тем, перспективными разработками могут стать панели биомаркеров для отслеживания метаболических изменений у детей и подростков спортсменов [45], поэтому необходимы дальнейшие высококачественные исследования влияния различных видов тренировок на метаболом и гормональный фон у детей различного возраста.

Важным результатом исследований в этой области может стать разработка медицинских рекомендаций по планированию занятий физической культурой и спортом с учетом выявленных изменений в состоянии здоровья для гармоничного развития ребенка Одним из инструментов для реализации этой стратегии является создание новых методических рекомендаций для допуска детей к дополнительному образованию в области физической культуры и спорта, отвечающих современным тенденциям в трансформации здоровья детей и современным методам диагностики.

Финансирование

Статья выполнена в рамках государственного задания «Многолетний мониторинг состояния опорно-двигательного аппарата у детей, занимающихся видом спорта (экспериментальная группа) и не занимающихся спортом детей (контрольная группа)» № 056-00083-24-00, утвержденного заместителем Министерства здравоохранения Российской Федерации Семеновой Т.В. 14 января 2024 г.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Funding

The article was prepared as part of the state assignment ‘Long-term monitoring of the condition of the musculoskeletal system in children who participate in sport (experimental group) and children who do not participate in sport (control group)’ No. 056-00083-24-00, approved by T.V. Semenova, Deputy Minister of Health of the Russian Federation, on 14 January 2024.

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

Список литературы / References

1. Castro A. Association Between Changes in Serum and Skeletal Muscle Metabolomics Profile With Maximum Power Output Gains in Response to Different Aerobic Training Programs: The Times Study / A. Castro, R.G. Duft, S.G. de Oliveira-Nunes et al. // Frontiers in Physiology. — 2021. — 12. — P. 756618. — DOI: 10.3389/fphys.2021.756618.

2. Hou J.L. Integration of Metabolomics and Transcriptomics to Reveal the Metabolic Characteristics of Exercise-Improved Bone Mass / J.L. Hou, W.Y. Yang, Q. Zhang et al. // Nutrients. — 2023. — 7. — P. 1694. — DOI: 10.3390/nu15071694.

3. Reitzner S.M. Molecular profiling of high-level athlete skeletal muscle after acute endurance or resistance exercise – A systems biology approach / S.M. Reitzner, E.B. Emanuelsson, M. Arif et al. // Molecular Metabolism. — 2024. — 79. — P. 101857. — DOI: 10.1016/j.molmet.2023.101857.

4. Li M. Treadmill training impacts the skeletal muscle molecular clock after ischemia stroke in rats / M. Li, Y. Yin, D. Qin // Heliyon. — 2024. — 6. — P. e27430. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27430

5. Castro A. Association of skeletal muscle and serum metabolites with maximum power output gains in response to continuous endurance or high-intensity interval training programs: The TIMES study – A randomized controlled trial / A. Castro, R.G. Duft, M.L.V. Ferreira et al. // PLoS ONE. — 2019. — 2. — P. e0212115. — DOI: 10.1371/journal.pone.0212115

6. Yang Y.R. Potential Roles of Exercise-Induced Plasma Metabolites Linking Exercise to Health Benefits / Y.R. Yang, K.S. Kwon // Frontiers in Physiology. — 2020. — 11. — P. 602748. — DOI: 10.3389/fphys.2020.602748

7. Khoramipour K. Metabolomics in Exercise and Sports: A Systematic Review / K. Khoramipour, Ø. Sandbakk, A.H. Keshteli et al. // Sports Medicine. — 2022. — 3. — P. 547–583. — DOI: 10.1007/s40279-021-01582-y.

8. Yang R. The combined analysis of urine and blood metabolomics profiles provides an accurate prediction of the training and competitive status of Chinese professional swimmers / R. Yang, Y. Wang, C. Yuan et al. // Frontiers in Physiology. — 2023. — 14. — P. 1197224. — DOI: 10.3389/fphys.2023.1197224.

 © Авторы статьи / Authors of the article

9. Furrer R. The molecular athlete: exercise physiology from mechanisms to medals / R. Furrer, J.A. Hawley, C. Handschin // Physiological Reviews. — 2023. — 3. — P. 1693–1787. — DOI: 10.1152/physrev.00017.2022

10. Nemkov T. Metabolic Signatures of Performance in Elite World Tour Professional Male Cyclists / T. Nemkov, F. Cendali, D. Stefanoni et al. // Sports Medicine. — 2023. — 8. — P. 1651–1665. — DOI: 10.1007/s40279-023-01846-9

11. Al-Khelaifi F. Metabolic profiling of elite athletes with different cardiovascular demand / F. Al-Khelaifi, F. Donati, F. Botrè et al. // Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. — 2019. — 7. — P. 933–943. — DOI: 10.1111/sms.13425.

12. Tarkhan A.H. Comparing metabolic profiles between female endurance athletes and non-athletes reveals differences in androgen and corticosteroid levels / A.H. Tarkhan, N.R. Anwardeen, M. Sellami et al. // The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology. — 2022. — 219. — P. 106081. — DOI: 10.1016/j.jsbmb.2022.106081

13. San-Millán I. Metabolomics of Endurance Capacity in World Tour Professional Cyclists / I. San-Millán, D. Stefanoni, J.L. Martinez et al. // Frontiers in Physiology. — 2020. — 11. — P. 578. — DOI: 10.3389/fphys.2020.00578

14. Alheidous S. Effect of sera from elite athletes on cytokine secretion and insulin signaling in preadipocytes and skeletal muscle cells / S. Alheidous, S. Al-Muraikhy, N. Rizk et al. // Frontiers in Molecular Biosciences. — 2022. — 9. — P. 943034. — DOI: 10.3389/fmolb.2022.943034

15. Qi S. Research advances in the application of metabolomics in exercise science / S. Qi, X. Li, J. Yu et al. // Frontiers in Physiology. — 2024. — 14. — P. 1332104. — DOI: 10.3389/fphys.2023.1332104

16. Alldritt I. Metabolomics as an Important Tool for Determining the Mechanisms of Human Skeletal Muscle Deconditioning / I. Alldritt, P.L. Greenhaff, D.J. Wilkinson // International Journal of Molecular Sciences. — 2021. — 24. — P. 13575. — DOI: 10.3390/ijms222413575

17. Rodas G. A targeted metabolic analysis of football players and its association to player load: Comparison between women and men profiles / G. Rodas, E. Ferrer, X. Reche et al. // Frontiers in Physiology. — 2022. — 13. — P. 923608. — DOI: 10.3389/fphys.2022.923608

18. Bennett S. Acute heat stress amplifies exercise-induced metabolomic perturbations and reveals variation in circulating amino acids in endurance-trained males / S. Bennett, F. Brocherie, M.M. Phelan et al. // Experimental Physiology. — 2023. — 6. — P. 838–851. — DOI: 10.1113/EP090911

19. Deane C.S. Harnessing metabolomics to better understand exercise-mediated substrate metabolism / C.S. Deane, J.R. Swann // Experimental Physiology. — 2023. — 6. — P. 797–798. — DOI: 10.1113/EP091127

20. Bongiovanni T. Sportomics: metabolomics applied to sports. The new revolution? / T. Bongiovanni, R. Pintus, A. Dessì et al. // European Review for Medical and Pharmacological Sciences. — 2019. — 24. — P. 11011–11019. — DOI: 10.26355/eurrev_201912_19807

21. Gomez-Cabrera M.C. Redox-related biomarkers in physical exercise / M.C. Gomez-Cabrera, A. Carretero, F. Millan-Domingo et al. // Redox Biology. — 2021. — 42. — P. 101956. — DOI: 10.1016/j.redox.2021.101956

22. Wu M. Hepatic AMPK signaling dynamic activation in response to REDOX balance are sentinel biomarkers of exercise and antioxidant intervention to improve blood glucose control / M. Wu, A. Zhao, X. Yan et al. // eLife. — 2022. — 11. — P. e79939. — DOI: 10.7554/eLife.79939

23. De Veaux R. Age and performance in masters swimming and running / R. De Veaux, A. Plantinga, E. Upton // Journal of Quantitative Analysis in Sports. — 2025. — 2. — P. 137–152. — DOI: 10.1515/jqas-2024-0018

24. Ryan B.J. Moderate-Intensity Exercise and High-Intensity Interval Training Affect Insulin Sensitivity Similarly in Obese Adults / B.J. Ryan, M.W. Schleh, C. Ahn et al. // The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism. — 2020. — 8. — P. E2941–E2959. — DOI: 10.1210/clinem/dgaa345

25. Deane C.S. Harnessing metabolomics to better understand exercise-mediated substrate metabolism / C.S. Deane, J.R. Swann // Experimental Physiology. — 2023. — 6. — P. 797–798. — DOI: 10.1113/EP091127

26. Castro A. Commentary: Metabolomics-Based Studies Assessing Exercise-Induced Alterations of the Human Metabolome: A Systematic Review / A. Castro, R.G. Duft, A.C.M. Zeri et al. // Frontiers in Physiology. — 2020. — 11. — P. 353. — DOI: 10.3389/fphys.2020.00353

27. Wilkinson D.J. Untargeted metabolomics for uncovering biological markers of human skeletal muscle ageing / D.J. Wilkinson, G. Rodriguez-Blanco, W.B. Dunn et al. // Aging. — 2020. — 13. — P. 12517–12533. — DOI: 10.18632/aging.103513

28. Haller N. Blood-Based Biomarkers for Managing Workload in Athletes: Perspectives for Research on Emerging Biomarkers / N. Haller, T. Reichel, P. Zimmer et al. // Sports Medicine. — 2023. — 11. — P. 2039–2053. — DOI: 10.1007/s40279-023-01866-5

29. Сотникова-Мелешкина Ж.В. Современные подходы к оценке физического развития детей и подростков / Ж.В. Сотникова-Мелешкина, О.Х. Зинчук, О.Я. Михальчук // Здоровье ребенка. — 2021. — 1. — С. 33–39. — DOI: 10.22141/2224-0551.16.1.2021.226452

30. Latella C. The Acute Neuromuscular Responses to Cluster Set Resistance Training: A Systematic Review and Meta-Analysis / C. Latella, W.P. Teo, E.J. Drinkwater et al. // Sports Medicine. — 2019. — 12. — P. 1861–1877. — DOI: 10.1007/s40279-019-01172-z

31. Shi R. Runners' metabolomic changes following marathon / R. Shi, J. Zhang, B. Fang et al. // Nutrition & Metabolism. — 2020. — 1. — P. 53. — DOI: 10.1186/s12986-020-00436-0

32. Sirago G. Skeletal Muscle Mitochondrial and Perilipin Content in a Cohort of Obese Subjects Undergoing Moderate and High Intensity Training / G. Sirago, F. Vaccari, S. Lazzer et al. // Metabolites. — 2022. — 9. — P. 855. — DOI: 10.3390/metabo12090855

33. Kusy K. Changes in Plasma Free Amino Acid Profile in Endurance Athletes over a 9-Month Training Cycle / K. Kusy, M. Ciekot-Sołtysiak, J. Matysiak et al. // Metabolites. — 2024. — 7. — P. 353. — DOI: 10.3390/metabo14070353

 © Авторы статьи / Authors of the article

34. Hiratsu A. The effects of acute and chronic oral l-arginine supplementation on exercise-induced ammonia accumulation and exercise performance in healthy young men: A randomised, double-blind, cross-over, placebo-controlled trial / A. Hiratsu, Y. Tataka, S. Namura et al. // Journal of Exercise Science & Fitness. — 2022. — 2. — P. 140–147. — DOI: 10.1016/j.jesf.2022.02.003

35. Derek A. Different Training Methods Cause Similar Muscle Damage in Youth Judo Athletes / A. Derek, H. Karninčić, E. Franchini et al. // Journal of Human Kinetics. — 2021. — 78. — P. 79–87. — DOI: 10.2478/hukin-2021-0030

36. Muniz-Santos R. Sportomics Analyses of the Exercise-Induced Impact on Amino Acid Metabolism and Acute-Phase Protein Kinetics in Female Olympic Athletes / R. Muniz-Santos, A. Bassini, J. Falcão et al. // Nutrients. — 2024. — 20. — P. 3538. — DOI: 10.3390/nu16203538

37. Pintus R. Sportomics in professional soccer players: metabolomics results during preseason / R. Pintus, T. Bongiovanni, S. Corbu et al. // The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness. — 2021. — 2. — P. 324–330. — DOI: 10.23736/S0022-4707.20.11200-3

38. Schader J.F. Metabolite Shifts Induced by Marathon Race Competition Differ between Athletes Based on Level of Fitness and Performance: A Substudy of the Enzy-MagIC Study / J.F. Schader, M. Haid, A. Cecil et al. // Metabolites. — 2020. — 3. — P. 87. — DOI: 10.3390/metabo10030087

39. Granata C. Training-Induced Changes in Mitochondrial Content and Respiratory Function in Human Skeletal Muscle / C. Granata, N.A. Jamnick, D.J. Bishop // Sports Medicine. — 2018. — 8. — P. 1809–1828. — DOI: 10.1007/s40279-018-0936-y

40. Liu Y. Adaptations to 4 weeks of high-intensity interval training in healthy adults with different training backgrounds / Y. Liu, Y. Xia, T. Yue et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2023. — 6. — P. 1283–1297. — DOI: 10.1007/s00421-023-05152-0

41. Hering G.O. The Maximal Lactate Steady State Workload Determines Individual Swimming Performance / G.O. Hering, J. Stepan // Frontiers in Physiology. — 2021. — 12. — P. 668123. — DOI: 10.3389/fphys.2021.668123

42. Koay Y.C. Effect of chronic exercise in healthy young male adults: a metabolomic analysis / Y.C. Koay, K. Stanton, V. Kienzle et al. // Cardiovascular Research. — 2021. — 2. — P. 613–622. — DOI: 10.1093/cvr/cvaa051

43. Viribay A. Effects of Arginine Supplementation on Athletic Performance Based on Energy Metabolism: A Systematic Review and Meta-Analysis / A. Viribay, J. Burgos, J. Fernández-Landa et al. // Nutrients. — 2020. — 5. — P. 1300. — DOI: 10.3390/nu12051300

44. Salem A. Attenuating Muscle Damage Biomarkers and Muscle Soreness After an Exercise-Induced Muscle Damage with Branched-Chain Amino Acid (BCAA) Supplementation: A Systematic Review and Meta-analysis with Meta-regression / A. Salem, K. Ben Maaoui, H. Jahrami et al. // Sports Medicine – Open. — 2024. — 1. — P. 42. — DOI: 10.1186/s40798-024-00686-9

45. Stepanova N.A. Antropometricheskie i biokhimicheskie pokazateli sportsmenov pubertatnogo vozrasta: monografiia [Anthropometric and biochemical parameters of puberty athletes: monograph] / N.A. Stepanova, M.S. Al'tani, A.A. Chir'kina et al. — Cheboksary: Sreda, 2020. — P. 112. — DOI: 10.31483/r-75270

46. Prieto-Bellver G. A Five-Week Periodized Carbohydrate Diet Does Not Improve Maximal Lactate Steady-State Exercise Capacity and Substrate Oxidation in Well-Trained Cyclists compared to a High-Carbohydrate Diet / G. Prieto-Bellver, J. Diaz-Lara, D.J. Bishop et al. // Nutrients. — 2024. — 2. — P. 318. — DOI: 10.3390/nu16020318

47. Malsagova K.A. Metabolomic and Proteomic Profiling of Athletes Performing Physical Activity under Hypoxic Conditions / K.A. Malsagova, A.T. Kopylov, A.A. Stepanov et al. // Sports. — 2024. — 3. — P. 72. — DOI: 10.3390/sports12030072

48. Lusk H.J. Branched-chain amino acid catabolism promotes ovarian cancer cell proliferation via phosphorylation of mTOR / H.J. Lusk, M.A. Haughan, T.M. Bergsten et al. // Cancer Research Communications. — 2025. — 4. — P. 569–579. — DOI: 10.1158/2767-9764.CRC-24-0532

49. Oliveira T.M. A Decrease in Branched-Chain Amino Acids after a Competitive Male Professional Volleyball Game—A Metabolomic-Based Approach / T.M. Oliveira, T.J. Ferreira, P.A.P. Ferreira et al. // Metabolites. — 2024. — 2. — P. 115. — DOI: 10.3390/metabo14020115

50. Wolfe R.R. Branched-chain amino acids and muscle protein synthesis in humans: myth or reality? / R.R. Wolfe // Journal of the International Society of Sports Nutrition. — 2017. — 14. — P. 30. — DOI: 10.1186/s12970-017-0184-9

51. Schranner D. Metabolite Concentration Changes in Humans After a Bout of Exercise: a Systematic Review of Exercise Metabolomics Studies / D. Schranner, G. Kastenmüller, M. Schönfelder et al. // Sports Medicine. — 2020. — 1. — DOI: 10.1186/s40798-020-0238-4

52. Lee S. Branched-chain amino acid metabolism, insulin sensitivity and liver fat response to exercise training in sedentary dysglycaemic and normoglycaemic men / S. Lee, H.L. Gulseth, T.M. Langleite et al. // Diabetologia. — 2021. — 2. — P. 410–423. — DOI: 10.1007/s00125-020-05296-0

53. Биктимирова А.А. Особенности обмена аминокислот у юных спортсменов / А.А. Биктимирова, Н.В. Рылова, В.С. Сухоруков // Российский вестник перинатологии и педиатрии. — 2016. — 5. — С. 183–186. — DOI: 10.21508/1027-4065-2016-61-5-183-186

54. Moitzi A.M. Longer-Term Effects of the Glycaemic Index on Substrate Metabolism and Performance in Endurance Athletes / A.M. Moitzi, D. König // Nutrients. — 2023. — 13. — P. 3028. — DOI: 10.3390/nu15133028

55. Holeček M. Muscle Amino Acid and Adenine Nucleotide Metabolism during Exercise and in Liver Cirrhosis: Speculations on How to Reduce the Harmful Effects of Ammonia / M. Holeček // Metabolites. — 2022. — 10. — P. 971. — DOI: 10.3390/metabo12100971

 © Авторы статьи / Authors of the article

56. Sakaguchi C.A. Metabolomics-Based Studies Assessing Exercise-Induced Alterations of the Human Metabolome: A Systematic Review / C.A. Sakaguchi, D.C. Nieman, E.F. Signini et al. // Metabolites. — 2019. — 8. — P. 164. — DOI: 10.3390/metabo9080164

57. Jordan F. Human 2-Oxoglutarate Dehydrogenase and 2-Oxoadipate Dehydrogenase Both Generate Superoxide/H2O2 in a Side Reaction and Each Could Contribute to Oxidative Stress in Mitochondria / F. Jordan, N. Nemeria, G. Gerfen // Neurochemical Research. — 2019. — 10. — P. 2325–2335. — DOI: 10.1007/s11064-019-02765-w

58. Zhang J. Leucine mediates autophagosome-lysosome fusion and improves sperm motility by activating the PI3K/Akt pathway / J. Zhang, X. Zhang, Y. Liu et al. // Oncotarget. — 2017. — 67. — P. 111807–111818. — DOI: 10.18632/oncotarget.22910

59. Miura N. Subchronic Tolerance Trials of Graded Oral Supplementation with Phenylalanine or Serine in Healthy Adults / N. Miura, H. Matsumoto, L. Cynober et al. // Nutrients. — 2021. — 6. — P. 1976. — DOI: 10.3390/nu13061976

60. Brodnik Z.D. L-Tyrosine availability affects basal and stimulated catecholamine indices in prefrontal cortex and striatum of the rat / Z.D. Brodnik, M. Double, R.A. España et al. // Neuropharmacology. — 2017. — 123. — P. 159–174. — DOI: 10.1016/j.neuropharm.2017.05.030

61. Garibotto G. Effects of Low-Protein, and Supplemented Very Low-Protein Diets, on Muscle Protein Turnover in Patients With CKD / G. Garibotto, A. Sofia, E.I. Parodi et al. // Kidney International Reports. — 2018. — 3. — P. 701–710. — DOI: 10.1016/j.ekir.2018.01.003

62. Matsui Y. Effect of a leucine-enriched essential amino acids mixture on muscle recovery / Y. Matsui, S. Takayanagi, T. Ohira et al. // Journal of Physical Therapy Science. — 2019. — 1. — P. 95–101. — DOI: 10.1589/jpts.31.95

63. Waskiw-Ford M. Leucine-Enriched Essential Amino Acids Improve Recovery from Post-Exercise Muscle Damage Independent of Increases in Integrated Myofibrillar Protein Synthesis in Young Men / M. Waskiw-Ford, S. Hannaian, J. Duncan et al. // Nutrients. — 2020. — 4. — P. 1061. — DOI: 10.3390/nu12041061

64. Castro A. Understanding the Relationship between Intrinsic Cardiorespiratory Fitness and Serum and Skeletal Muscle Metabolomics Profile / A. Castro, R.G. Duft, L.M. Silva et al. // Journal of Proteome Research. — 2021. — 5. — P. 2397–2409. — DOI: 10.1021/acs.jproteome.0c00905

65. Matthews J.J. The Physiological Roles of Carnosine and β-Alanine in Exercising Human Skeletal Muscle / J.J. Matthews, G.G. Artioli, M.D. Turner et al. // Medicine & Science in Sports & Exercise. — 2019. — 10. — P. 2098–2108. — DOI: 10.1249/MSS.0000000000002033

66. Fernández-Lázaro D. β-Alanine Supplementation in Combat Sports: Evaluation of Sports Performance, Perception, and Anthropometric Parameters and Biochemical Markers—A Systematic Review of Clinical Trials / D. Fernández-Lázaro, E.M. Fiandor, J.F. García et al. // Nutrients. — 2023. — 17. — P. 3755. — DOI: 10.3390/nu15173755

67. Ávila-Gandía V. One-Week High-Dose β-Alanine Loading Improves World Tour Cyclists' Time-Trial Performance / V. Ávila-Gandía, A. Torregrosa-García, S. Pérez-Piñero et al. // Nutrients. — 2021. — 8. — P. 2543. — DOI: 10.3390/nu13082543

68. Forbes S.C. Supplements and Nutritional Interventions to Augment High-Intensity Interval Training Physiological and Performance Adaptations—A Narrative Review / S.C. Forbes, D.G. Candow, A.E. Smith-Ryan et al. // Nutrients. — 2020. — 2. — P. 390. — DOI: 10.3390/nu12020390

69. Brugnara L. Muscular carnosine is a marker for cardiorespiratory fitness and cardiometabolic risk factors in men with type 1 diabetes / L. Brugnara, A.I. García, S. Murillo et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2022. — 6. — P. 1429–1440. — DOI: 10.1007/s00421-022-04929-z

70. Lievens E. CORP: quantification of human skeletal muscle carnosine concentration by proton magnetic resonance spectroscopy / E. Lievens, K. Van Vossel, F. Van de Casteele et al. // Journal of Applied Physiology. — 2021. — 1. — P. 250–264. — DOI: 10.1152/japplphysiol.00056.2021

71. Saunders B. β-Alanine supplementation to improve exercise capacity and performance: a systematic review and meta-analysis / B. Saunders, K. Elliott-Sale, G.G. Artioli // British Journal of Sports Medicine. — 2017. — 8. — P. 658–669. — DOI: 10.1136/bjsports-2016-096396

72. Georgiou G.D. Effect of Beta-Alanine Supplementation on Maximal Intensity Exercise in Trained Young Male Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis / G.D. Georgiou, K. Antoniou, S. Antoniou et al. // International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism. — 2024. — 6. — P. 397–412. — DOI: 10.1123/ijsnem.2024-0027

73. Dünnwald T. High Intensity Concentric-Eccentric Exercise Under Hypoxia Changes the Blood Metabolome of Trained Athletes / T. Dünnwald, G. Paglia, G. Weiss et al. // Frontiers in Physiology. — 2022. — 13. — P. 904618. — DOI: 10.3389/fphys.2022.904618

74. Campbell M.D. Age-related changes of skeletal muscle metabolic response to contraction are also sex-dependent / M.D. Campbell, D. Djukovic, D. Raftery et al. // The Journal of Physiology. — 2025. — 1. — P. 69–86. — DOI: 10.1113/JP285124

75. Cai X. α-ketoglutarate prevents skeletal muscle protein degradation and muscle atrophy through PHD3/ADRB2 pathway / X. Cai, Y. Yuan, Z. Liao et al. // The FASEB Journal. — 2018. — 2. — P. 488–499. — DOI: 10.1096/fj.201700670R

76. Gyanwali B. Alpha-Ketoglutarate Dietary Supplementation to Improve Health in Humans / B. Gyanwali, Z.X. Lim, J. Soh et al. // Trends in Endocrinology & Metabolism. — 2022. — 2. — P. 136–146. — DOI: 10.1016/j.tem.2021.11.003

77. Wu D. Low Protein Diets Supplemented with Alpha-Ketoglutarate Enhance the Growth Performance, Immune Response, and Intestinal Health in Common Carp (Cyprinus carpio) / D. Wu, Z. Fan, J. Li et al. // Frontiers in Immunology. — 2022. — 13. — P. 915657. — DOI: 10.3389/fimmu.2022.915657

78. Naeini S.H. Alpha-Ketoglutarate as a Potent Regulator for Lifespan and Healthspan: Evidences and Perspectives / S.H. Naeini, L. Mavaddatiyan, Z.R. Kalkhoran et al. // Experimental Gerontology. — 2023. — 175. — P. 112154. — DOI: 10.1016/j.exger.2023.112154

 © Авторы статьи / Authors of the article

79. Zhao L. Effects of Low-Protein Diet Supplementation with Alpha-Ketoglutarate on Growth Performance, Nitrogen Metabolism and mTOR Signalling Pathway of Skeletal Muscle in Piglets / L. Zhao, H. Guo, H. Sun // Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. — 2020. — 1. — P. 300–309. — DOI: 10.1111/jpn.13230

80. Nijholt K.T. Exercise: A Molecular Tool to Boost Muscle Growth and Mitochondrial Performance in Heart Failure / K.T. Nijholt, P.I. Sánchez-Aguilera, S.N. Voorrips et al. // European Journal of Heart Failure. — 2022. — 2. — P. 287–298. — DOI: 10.1002/ejhf.2407

81. Xu M. Impact of Alpha-Ketoglutarate on Skeletal Muscle Health and Exercise Performance: A Narrative Review / M. Xu, Q. Zhang, X. Liu et al. // Nutrients. — 2024. — 22. — P. 3968. — DOI: 10.3390/nu16223968

82. Yuan Y. Exercise-induced α-ketoglutaric acid stimulates muscle hypertrophy and fat loss through OXGR1-dependent adrenal activation / Y. Yuan, P. Xu, Q. Jiang et al. // The EMBO Journal. — 2020. — 7. — P. e103304. — DOI: 10.15252/embj.2019103304

83. Yuan Y. α-Ketoglutaric acid ameliorates hyperglycemia in diabetes by inhibiting hepatic gluconeogenesis via serpina1e signaling / Y. Yuan, C. Zhu, Y. Wang et al. // Science Advances. — 2022. — 18. — P. eabn2879. — DOI: 10.1126/sciadv.abn2879

84. Qi J. Exercise Training Attenuates Hypertension Through TLR4/MyD88/NF-κB Signaling in the Hypothalamic Paraventricular Nucleus / J. Qi, X.J. Yu, L.Y. Fu et al. // Frontiers in Neuroscience. — 2019. — 13. — P. 1138. — DOI: 10.3389/fnins.2019.01138

85. Tauler P. Antioxidant response and oxidative damage induced by a swimming session: Influence of gender / P. Tauler, M.D. Ferrer, D. Romaguera et al. // Journal of Sports Sciences. — 2008. — 2. — P. 1303–1311. — DOI: 10.1080/02640410801974992

86. Kong F. The Metabolome Characteristics of Aerobic Endurance Development in Adolescent Male Rowers Using Polarized and Threshold Model: An Original Research / F. Kong, M. Zhu, X. Pan et al. // Metabolites. — 2025. — 1. — P. 17. — DOI: 10.3390/metabo15010017

87. Davison G. Metabolomic Response to Acute Hypoxic Exercise and Recovery in Adult Males / G. Davison, M. Vinaixa, R. McGovern et al. // Frontiers in Physiology. — 2018. — 9. — P. 1682. — DOI: 10.3389/fphys.2018.01682

88. Antonioni A. Redox homeostasis in sport: do athletes really need antioxidant support? / A. Antonioni, C. Fantini, L. Dimauro et al. // Research in Sports Medicine. — 2019. — 2. — P. 147–165. — DOI: 10.1080/15438627.2018.1563899

89. Medoro A. Omega-3 Index as a Sport Biomarker: Implications for Cardiovascular Health, Injury Prevention, and Athletic Performance / A. Medoro, A. Buonsenso, M. Centorbi et al. // Journal of Functional Morphology and Kinesiology. — 2024. — 2. — P. 91. — DOI: 10.3390/jfmk9020091

90. Lu Y. Effects of High Intensity Exercise on Oxidative Stress and Antioxidant Status in Untrained Humans: A Systematic Review / Y. Lu, H.D. Wiltshire, J.S. Baker et al. // Biology. — 2021. — 12. — P. 1272. — DOI: 10.3390/biology10121272

91. Daniels M. Comparative analysis of circulating metabolomic profiles identifies shared metabolic alterations across distinct multistressor military training exercises / M. Daniels, L.M. Margolis, J.C. Rood et al. // Physiological Genomics. — 2024. — 7. — P. 457–468. — DOI: 10.1152/physiolgenomics.00008.2024

92. Cai M. Blood Metabolomics Analysis Identifies Differential Serum Metabolites in Elite and Sub-elite Swimmers / M. Cai, C. Wu, C. Jing et al. // Frontiers in Physiology. — 2022. — 13. — P. 858869. — DOI: 10.3389/fphys.2022.858869

93. Bestwick-Stevenson T. Assessment of Fatigue and Recovery in Sport: Narrative Review / T. Bestwick-Stevenson, R. Toone, E. Neupert et al. // International Journal of Sports Medicine. — 2022. — 14. — P. 1151–1162. — DOI: 10.1055/a-1834-7177

94. Pedlar C.R. Blood Biomarker Profiling and Monitoring for High-Performance Physiology and Nutrition: Current Perspectives, Limitations and Recommendations / C.R. Pedlar, J. Newell, N.A. Lewis // Sports Medicine. — 2019. — 49. — P. 185–198. — DOI: 10.1007/s40279-019-01158-x

95. la Torre M.E. The Potential Role of Nutrition in Overtraining Syndrome: A Narrative Review / M.E. la Torre, A. Monda, A. Messina et al. // Nutrients. — 2023. — 23. — P. 4916. — DOI: 10.3390/nu15234916

96. Howe C. Untargeted Metabolomics Profiling of an 80.5 km Simulated Treadmill Ultramarathon / C. Howe, A. Alshehri, D. Muggeridge et al. // Metabolites. — 2018. — 1. — P. 14. — DOI: 10.3390/metabo8010014

97. Trushina E.N. The efficiency of branched chain aminoacids (BCAA) in the nutrition of combat sport athletes / E.N. Trushina, V.D. Vybornov, N.A. Riger et al. // Voprosy pitalia [Nutrition Issues]. — 2019. — 4. — P. 48–56. — DOI: 10.24411/0042-8833-2019-10041

98. Jansson D. Hormonal and inflammatory responses in prepubertal vs. pubertal male children following an acute free-weight resistance training session / D. Jansson, E. Lundberg, A.C. Rullander et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2025. — 2. — P. 381–392. — DOI: 10.1007/s00421-024-05603-2

99. Sekine Y. Maturity-Associated Variations in Resistance Exercise-Induced Hormonal Responses in Young Male Athletes / Y. Sekine, N. Hirose // Pediatric Exercise Science. — 2022. — 1. — P. 28–35. — DOI: 10.1123/pes.2020-0170

100. Guth L.M. Carbohydrate consumption and variable-intensity exercise responses in boys and men / L.M. Guth, M.P. Rogowski, J.P. Guilkey et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2019. — 4. — P. 1019–1027. — DOI: 10.1007/s00421-019-04091-z

101. Jesuthasan A. Assessment of Changes in Physiological Markers in Different Body Fluids at Rest and after Exercise / A. Jesuthasan, A. Ali, J.K.W. Lee et al. // Nutrients. — 2022. — 21. — P. 4685. — DOI: 10.3390/nu14214685

102. Gharahdaghi N. Links Between Testosterone, Oestrogen, and the Growth Hormone/Insulin-Like Growth Factor Axis and Resistance Exercise Muscle Adaptations / N. Gharahdaghi, B.E. Phillips, N.J. Szewczyk et al. // Frontiers in Physiology. — 2021. — 11. — P. 621226. — DOI: 10.3389/fphys.2020.621226

 © Авторы статьи / Authors of the article

103. Kraemer W.J. Growth Hormone(s), Testosterone, Insulin-Like Growth Factors, and Cortisol: Roles and Integration for Cellular Development and Growth With Exercise / W.J. Kraemer, N.A. Ratamess, W.C. Hymer et al. // Frontiers in Endocrinology. — 2020. — 11. — P. 33. — DOI: 10.3389/fendo.2020.00033

104. Geisler S. Salivary testosterone and cortisol concentrations after two different resistance training exercises / S. Geisler, T. Aussieker, S. Paldauf et al. // The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness. — 2019. — 6. — P. 1030–1035. — DOI: 10.23736/S0022-4707.18.08786-8

105. Taipale R.S. Active and passive recovery influence responses of luteinizing hormone and testosterone to a fatiguing strength loading / R.S. Taipale, H. Kyröläinen, S.S. Gagnon et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2018. — 1. — P. 123–131. — DOI: 10.1007/s00421-017-3753-3

106. Yeom D.C. Effects of Low-Load, High-Repetition Resistance Training on Maximum Muscle Strength and Muscle Damage in Elite Weightlifters: A Preliminary Study / D.C. Yeom, D.J. Hwang, W.B. Lee et al. // International Journal of Molecular Sciences. — 2023. — 23. — P. 17079. — DOI: 10.3390/ijms242317079

107. Crewther B.T. Associations between the Big Five personality traits, testosterone, and cortisol in adolescent male athletes / B.T. Crewther, Z. Obmiński, D. Turowski et al. // Biology of Sport. — 2024. — 1. — P. 279–286. — DOI: 10.5114/biolsport.2024.127390

108. Gharahdaghi N. Testosterone therapy induces molecular programming augmenting physiological adaptations to resistance exercise in older men / N. Gharahdaghi, S. Rudrappa, M.S. Brook et al. // Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle. — 2019. — 6. — P. 1276–1294. — DOI: 10.1002/jcsm.12472

109. Hooper D.R. The presence of symptoms of testosterone deficiency in the exercise-hypogonadal male condition and the role of nutrition / D.R. Hooper, W.J. Kraemer, C. Saenz et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2017. — 7. — P. 1349–1357. — DOI: 10.1002/jcsm.12472

110. Kasper A.M. Case Study: Extreme Weight Making Causes Relative Energy Deficiency, Dehydration and Acute Kidney Injury in a Male Mixed Martial Arts Athlete / A.M. Kasper, B. Crighton, C. Langan-Evans et al. // International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism. — 2019. — 3. — P. 331–338. — DOI: 10.1123/ijsnem.2018-0029

111. Costache A.D. Beyond the Finish Line: The Impact and Dynamics of Biomarkers in Physical Exercise—A Narrative Review / A.D. Costache, I.I. Costache, R.Ș. Miftode et al. // Journal of Clinical Medicine. — 2021. — 21. — P. 4978. — DOI: 10.3390/jcm10214978

112. Jörres M. Physiological Changes, Activity, and Stress During a 100-km-24-h Walking-March / M. Jörres, H.C. Gunga, M. Steinach // Frontiers in Physiology. — 2021. — 12. — P. 640710. — DOI: 10.3389/fphys.2021.640710

113. Moore T.M. The impact of exercise on mitochondrial dynamics and the role of Drp1 in exercise performance and training adaptations in skeletal muscle / T.M. Moore, Z. Zhou, W. Cohn et al. // Molecular Metabolism. — 2019. — 21. — P. 51–67. — DOI: 10.1016/j.molmet.2018.11.012

114. Taylor D.F. Transcription Factor Movement and Exercise-Induced Mitochondrial Biogenesis in Human Skeletal Muscle: Current Knowledge and Future Perspectives / D.F. Taylor, D.J. Bishop // International Journal of Molecular Sciences. — 2022. — 3. — P. 1517. — DOI: 10.3390/ijms23031517

115. Dohlmann T.L. High-intensity interval training changes mitochondrial respiratory capacity differently in adipose tissue and skeletal muscle / T.L. Dohlmann, M. Hindsø, F. Dela et al. // Physiological Reports. — 2018. — 18. — P. e13857. — DOI: 10.14814/phy2.13857

116. Cadegiani F.A. Novel Markers of Recovery From Overtraining Syndrome: The EROS-LONGITUDINAL Study / F.A. Cadegiani, P.H.L. Silva, T.C.P. Abrao et al. // International Journal of Sports Physiology and Performance. — 2021. — 8. — P. 1175–1184. — DOI: 10.1123/ijspp.2020-0248

117. Carrard J. Diagnosing Overtraining Syndrome: A Scoping Review / J. Carrard, A.C. Rigort, C. Appenzeller-Herzog et al. // Sports Health. — 2022. — 5. — P. 665–673. — DOI: 10.1177/19417381211044739

118. Лиах В.И. Мировые тенденции развития системы физического воспитания в общеобразовательной школе / В.И. Лиах, С.П. Левушкин, В.Д. Сонькин // Nauka i sport: sovremennye tendentsii. — 2019. — 22. — С. 12–19.

119. Malsagova K.A. Molecular Profiling of Athletes Performing High-Intensity Exercises in Extreme Environments / K.A. Malsagova, A.T. Kopylov, A.A. Stepanov et al. // Sports. — 2023. — 2. — P. 36. — DOI: 10.3390/sports11020036

Список литературы на английском языке / References in English

1. Castro A. Association Between Changes in Serum and Skeletal Muscle Metabolomics Profile With Maximum Power Output Gains in Response to Different Aerobic Training Programs: The Times Study / A. Castro, R.G. Duft, S.G. de Oliveira-Nunes et al. // Frontiers in Physiology. — 2021. — 12. — P. 756618. — DOI: 10.3389/fphys.2021.756618.

2. Hou J.L. Integration of Metabolomics and Transcriptomics to Reveal the Metabolic Characteristics of Exercise-Improved Bone Mass / J.L. Hou, W.Y. Yang, Q. Zhang et al. // Nutrients. — 2023. — 7. — P. 1694. — DOI: 10.3390/nu15071694.

3. Reitzner S.M. Molecular profiling of high-level athlete skeletal muscle after acute endurance or resistance exercise – A systems biology approach / S.M. Reitzner, E.B. Emanuelsson, M. Arif et al. // Molecular Metabolism. — 2024. — 79. — P. 101857. — DOI: 10.1016/j.molmet.2023.101857.

4. Li M. Treadmill training impacts the skeletal muscle molecular clock after ischemia stroke in rats / M. Li, Y. Yin, D. Qin // Heliyon. — 2024. — 6. — P. e27430. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27430

5. Castro A. Association of skeletal muscle and serum metabolites with maximum power output gains in response to continuous endurance or high-intensity interval training programs: The TIMES study – A randomized controlled trial / A. Castro, R.G. Duft, M.L.V. Ferreira et al. // PLoS ONE. — 2019. — 2. — P. e0212115. — DOI: 10.1371/journal.pone.0212115

 © Авторы статьи / Authors of the article

6. Yang Y.R. Potential Roles of Exercise-Induced Plasma Metabolites Linking Exercise to Health Benefits / Y.R. Yang, K.S. Kwon // Frontiers in Physiology. — 2020. — 11. — P. 602748. — DOI: 10.3389/fphys.2020.602748

7. Khoramipour K. Metabolomics in Exercise and Sports: A Systematic Review / K. Khoramipour, Ø. Sandbakk, A.H. Keshteli et al. // Sports Medicine. — 2022. — 3. — P. 547–583. — DOI: 10.1007/s40279-021-01582-y.

8. Yang R. The combined analysis of urine and blood metabolomics profiles provides an accurate prediction of the training and competitive status of Chinese professional swimmers / R. Yang, Y. Wang, C. Yuan et al. // Frontiers in Physiology. — 2023. — 14. — P. 1197224. — DOI: 10.3389/fphys.2023.1197224.

9. Furrer R. The molecular athlete: exercise physiology from mechanisms to medals / R. Furrer, J.A. Hawley, C. Handschin // Physiological Reviews. — 2023. — 3. — P. 1693–1787. — DOI: 10.1152/physrev.00017.2022

10. Nemkov T. Metabolic Signatures of Performance in Elite World Tour Professional Male Cyclists / T. Nemkov, F. Cendali, D. Stefanoni et al. // Sports Medicine. — 2023. — 8. — P. 1651–1665. — DOI: 10.1007/s40279-023-01846-9

11. Al-Khelaifi F. Metabolic profiling of elite athletes with different cardiovascular demand / F. Al-Khelaifi, F. Donati, F. Botrè et al. // Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. — 2019. — 7. — P. 933–943. — DOI: 10.1111/sms.13425.

12. Tarkhan A.H. Comparing metabolic profiles between female endurance athletes and non-athletes reveals differences in androgen and corticosteroid levels / A.H. Tarkhan, N.R. Anwardeen, M. Sellami et al. // The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology. — 2022. — 219. — P. 106081. — DOI: 10.1016/j.jsbmb.2022.106081

13. San-Millán I. Metabolomics of Endurance Capacity in World Tour Professional Cyclists / I. San-Millán, D. Stefanoni, J.L. Martinez et al. // Frontiers in Physiology. — 2020. — 11. — P. 578. — DOI: 10.3389/fphys.2020.00578

14. Alheidous S. Effect of sera from elite athletes on cytokine secretion and insulin signaling in preadipocytes and skeletal muscle cells / S. Alheidous, S. Al-Muraikhy, N. Rizk et al. // Frontiers in Molecular Biosciences. — 2022. — 9. — P. 943034. — DOI: 10.3389/fmolb.2022.943034

15. Qi S. Research advances in the application of metabolomics in exercise science / S. Qi, X. Li, J. Yu et al. // Frontiers in Physiology. — 2024. — 14. — P. 1332104. — DOI: 10.3389/fphys.2023.1332104

16. Alldritt I. Metabolomics as an Important Tool for Determining the Mechanisms of Human Skeletal Muscle Deconditioning / I. Alldritt, P.L. Greenhaff, D.J. Wilkinson // International Journal of Molecular Sciences. — 2021. — 24. — P. 13575. — DOI: 10.3390/ijms222413575

17. Rodas G. A targeted metabolic analysis of football players and its association to player load: Comparison between women and men profiles / G. Rodas, E. Ferrer, X. Reche et al. // Frontiers in Physiology. — 2022. — 13. — P. 923608. — DOI: 10.3389/fphys.2022.923608

18. Bennett S. Acute heat stress amplifies exercise-induced metabolomic perturbations and reveals variation in circulating amino acids in endurance-trained males / S. Bennett, F. Brocherie, M.M. Phelan et al. // Experimental Physiology. — 2023. — 6. — P. 838–851. — DOI: 10.1113/EP090911

19. Deane C.S. Harnessing metabolomics to better understand exercise-mediated substrate metabolism / C.S. Deane, J.R. Swann // Experimental Physiology. — 2023. — 6. — P. 797–798. — DOI: 10.1113/EP091127

20. Bongiovanni T. Sportomics: metabolomics applied to sports. The new revolution? / T. Bongiovanni, R. Pintus, A. Dessì et al. // European Review for Medical and Pharmacological Sciences. — 2019. — 24. — P. 11011–11019. — DOI: 10.26355/eurrev_201912_19807

21. Gomez-Cabrera M.C. Redox-related biomarkers in physical exercise / M.C. Gomez-Cabrera, A. Carretero, F. Millan-Domingo et al. // Redox Biology. — 2021. — 42. — P. 101956. — DOI: 10.1016/j.redox.2021.101956

22. Wu M. Hepatic AMPK signaling dynamic activation in response to REDOX balance are sentinel biomarkers of exercise and antioxidant intervention to improve blood glucose control / M. Wu, A. Zhao, X. Yan et al. // eLife. — 2022. — 11. — P. e79939. — DOI: 10.7554/eLife.79939

23. De Veaux R. Age and performance in masters swimming and running / R. De Veaux, A. Plantinga, E. Upton // Journal of Quantitative Analysis in Sports. — 2025. — 2. — P. 137–152. — DOI: 10.1515/jqas-2024-0018

24. Ryan B.J. Moderate-Intensity Exercise and High-Intensity Interval Training Affect Insulin Sensitivity Similarly in Obese Adults / B.J. Ryan, M.W. Schleh, C. Ahn et al. // The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism. — 2020. — 8. — P. E2941–E2959. — DOI: 10.1210/clinem/dgaa345

25. Deane C.S. Harnessing metabolomics to better understand exercise-mediated substrate metabolism / C.S. Deane, J.R. Swann // Experimental Physiology. — 2023. — 6. — P. 797–798. — DOI: 10.1113/EP091127

26. Castro A. Commentary: Metabolomics-Based Studies Assessing Exercise-Induced Alterations of the Human Metabolome: A Systematic Review / A. Castro, R.G. Duft, A.C.M. Zeri et al. // Frontiers in Physiology. — 2020. — 11. — P. 353. — DOI: 10.3389/fphys.2020.00353

27. Wilkinson D.J. Untargeted metabolomics for uncovering biological markers of human skeletal muscle ageing / D.J. Wilkinson, G. Rodriguez-Blanco, W.B. Dunn et al. // Aging. — 2020. — 13. — P. 12517–12533. — DOI: 10.18632/aging.103513

28. Haller N. Blood-Based Biomarkers for Managing Workload in Athletes: Perspectives for Research on Emerging Biomarkers / N. Haller, T. Reichel, P. Zimmer et al. // Sports Medicine. — 2023. — 11. — P. 2039–2053. — DOI: 10.1007/s40279-023-01866-5

29. Sotnikova-Meleshkina Zh.V. Sovremenny'e podxody' k ocenke fizicheskogo razvitiya detej i podrostkov [Modern approaches to assessing the physical development of children and adolescents] / Zh.V. Sotnikova-Meleshkina, O.X. Zinchuk, O.Ya. Mixal'chuk // Child's Health. — 2021. — 1. — P. 33–39. — DOI: 10.22141/2224-0551.16.1.2021.226452 [in Russian]

30. Latella C. The Acute Neuromuscular Responses to Cluster Set Resistance Training: A Systematic Review and Meta-Analysis / C. Latella, W.P. Teo, E.J. Drinkwater et al. // Sports Medicine. — 2019. — 12. — P. 1861–1877. — DOI: 10.1007/s40279-019-01172-z

 © Авторы статьи / Authors of the article

31. Shi R. Runners' metabolomic changes following marathon / R. Shi, J. Zhang, B. Fang et al. // Nutrition & Metabolism. — 2020. — 1. — P. 53. — DOI: 10.1186/s12986-020-00436-0

32. Sirago G. Skeletal Muscle Mitochondrial and Perilipin Content in a Cohort of Obese Subjects Undergoing Moderate and High Intensity Training / G. Sirago, F. Vaccari, S. Lazzer et al. // Metabolites. — 2022. — 9. — P. 855. — DOI: 10.3390/metabo12090855

33. Kusy K. Changes in Plasma Free Amino Acid Profile in Endurance Athletes over a 9-Month Training Cycle / K. Kusy, M. Ciekot-Sołtysiak, J. Matysiak et al. // Metabolites. — 2024. — 7. — P. 353. — DOI: 10.3390/metabo14070353

34. Hiratsu A. The effects of acute and chronic oral l-arginine supplementation on exercise-induced ammonia accumulation and exercise performance in healthy young men: A randomised, double-blind, cross-over, placebo-controlled trial / A. Hiratsu, Y. Tataka, S. Namura et al. // Journal of Exercise Science & Fitness. — 2022. — 2. — P. 140–147. — DOI: 10.1016/j.jesf.2022.02.003

35. Derek A. Different Training Methods Cause Similar Muscle Damage in Youth Judo Athletes / A. Derek, H. Karninčić, E. Franchini et al. // Journal of Human Kinetics. — 2021. — 78. — P. 79–87. — DOI: 10.2478/hukin-2021-0030

36. Muniz-Santos R. Sportomics Analyses of the Exercise-Induced Impact on Amino Acid Metabolism and Acute-Phase Protein Kinetics in Female Olympic Athletes / R. Muniz-Santos, A. Bassini, J. Falcão et al. // Nutrients. — 2024. — 20. — P. 3538. — DOI: 10.3390/nu16203538

37. Pintus R. Sportomics in professional soccer players: metabolomics results during preseason / R. Pintus, T. Bongiovanni, S. Corbu et al. // The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness. — 2021. — 2. — P. 324–330. — DOI: 10.23736/S0022-4707.20.11200-3

38. Schader J.F. Metabolite Shifts Induced by Marathon Race Competition Differ between Athletes Based on Level of Fitness and Performance: A Substudy of the Enzy-MagIC Study / J.F. Schader, M. Haid, A. Cecil et al. // Metabolites. — 2020. — 3. — P. 87. — DOI: 10.3390/metabo10030087

39. Granata C. Training-Induced Changes in Mitochondrial Content and Respiratory Function in Human Skeletal Muscle / C. Granata, N.A. Jamnick, D.J. Bishop // Sports Medicine. — 2018. — 8. — P. 1809–1828. — DOI: 10.1007/s40279-018-0936-y

40. Liu Y. Adaptations to 4 weeks of high-intensity interval training in healthy adults with different training backgrounds / Y. Liu, Y. Xia, T. Yue et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2023. — 6. — P. 1283–1297. — DOI: 10.1007/s00421-023-05152-0

41. Hering G.O. The Maximal Lactate Steady State Workload Determines Individual Swimming Performance / G.O. Hering, J. Stepan // Frontiers in Physiology. — 2021. — 12. — P. 668123. — DOI: 10.3389/fphys.2021.668123

42. Koay Y.C. Effect of chronic exercise in healthy young male adults: a metabolomic analysis / Y.C. Koay, K. Stanton, V. Kienzle et al. // Cardiovascular Research. — 2021. — 2. — P. 613–622. — DOI: 10.1093/cvr/cvaa051

43. Viribay A. Effects of Arginine Supplementation on Athletic Performance Based on Energy Metabolism: A Systematic Review and Meta-Analysis / A. Viribay, J. Burgos, J. Fernández-Landa et al. // Nutrients. — 2020. — 5. — P. 1300. — DOI: 10.3390/nu12051300

44. Salem A. Attenuating Muscle Damage Biomarkers and Muscle Soreness After an Exercise-Induced Muscle Damage with Branched-Chain Amino Acid (BCAA) Supplementation: A Systematic Review and Meta-analysis with Meta-regression / A. Salem, K. Ben Maaoui, H. Jahrami et al. // Sports Medicine – Open. — 2024. — 1. — P. 42. — DOI: 10.1186/s40798-024-00686-9

45. Stepanova N.A. Antropometricheskie i biokhimicheskie pokazateli sportsmenov pubertatnogo vozrasta: monografiia [Anthropometric and biochemical parameters of puberty athletes: monograph] / N.A. Stepanova, M.S. Al'tani, A.A. Chir'kina et al. — Cheboksary: Sreda, 2020. — P. 112. — DOI: 10.31483/r-75270

46. Prieto-Bellver G. A Five-Week Periodized Carbohydrate Diet Does Not Improve Maximal Lactate Steady-State Exercise Capacity and Substrate Oxidation in Well-Trained Cyclists compared to a High-Carbohydrate Diet / G. Prieto-Bellver, J. Diaz-Lara, D.J. Bishop et al. // Nutrients. — 2024. — 2. — P. 318. — DOI: 10.3390/nu16020318

47. Malsagova K.A. Metabolomic and Proteomic Profiling of Athletes Performing Physical Activity under Hypoxic Conditions / K.A. Malsagova, A.T. Kopylov, A.A. Stepanov et al. // Sports. — 2024. — 3. — P. 72. — DOI: 10.3390/sports12030072

48. Lusk H.J. Branched-chain amino acid catabolism promotes ovarian cancer cell proliferation via phosphorylation of mTOR / H.J. Lusk, M.A. Haughan, T.M. Bergsten et al. // Cancer Research Communications. — 2025. — 4. — P. 569–579. — DOI: 10.1158/2767-9764.CRC-24-0532

49. Oliveira T.M. A Decrease in Branched-Chain Amino Acids after a Competitive Male Professional Volleyball Game—A Metabolomic-Based Approach / T.M. Oliveira, T.J. Ferreira, P.A.P. Ferreira et al. // Metabolites. — 2024. — 2. — P. 115. — DOI: 10.3390/metabo14020115

50. Wolfe R.R. Branched-chain amino acids and muscle protein synthesis in humans: myth or reality? / R.R. Wolfe // Journal of the International Society of Sports Nutrition. — 2017. — 14. — P. 30. — DOI: 10.1186/s12970-017-0184-9

51. Schranner D. Metabolite Concentration Changes in Humans After a Bout of Exercise: a Systematic Review of Exercise Metabolomics Studies / D. Schranner, G. Kastenmüller, M. Schönfelder et al. // Sports Medicine. — 2020. — 1. — DOI: 10.1186/s40798-020-0238-4

52. Lee S. Branched-chain amino acid metabolism, insulin sensitivity and liver fat response to exercise training in sedentary dysglycaemic and normoglycaemic men / S. Lee, H.L. Gulseth, T.M. Langleite et al. // Diabetologia. — 2021. — 2. — P. 410–423. — DOI: 10.1007/s00125-020-05296-0

53. Biktimirova A.A. Osobennosti obmena aminokislot u yuny'x sportsmenov [Features of amino acid metabolism in young athletes] / A.A. Biktimirova, N.V. Ry'lova, V.S. Suxorukov // Russian Journal of Perinatology and Paediatrics. — 2016. — 5. — P. 183–186. — DOI: 10.21508/1027-4065-2016-61-5-183-186 [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

54. Moitzi A.M. Longer-Term Effects of the Glycaemic Index on Substrate Metabolism and Performance in Endurance Athletes / A.M. Moitzi, D. König // Nutrients. — 2023. — 13. — P. 3028. — DOI: 10.3390/nu15133028

55. Holeček M. Muscle Amino Acid and Adenine Nucleotide Metabolism during Exercise and in Liver Cirrhosis: Speculations on How to Reduce the Harmful Effects of Ammonia / M. Holeček // Metabolites. — 2022. — 10. — P. 971. — DOI: 10.3390/metabo12100971

56. Sakaguchi C.A. Metabolomics-Based Studies Assessing Exercise-Induced Alterations of the Human Metabolome: A Systematic Review / C.A. Sakaguchi, D.C. Nieman, E.F. Signini et al. // Metabolites. — 2019. — 8. — P. 164. — DOI: 10.3390/metabo9080164

57. Jordan F. Human 2-Oxoglutarate Dehydrogenase and 2-Oxoadipate Dehydrogenase Both Generate Superoxide/H2O2 in a Side Reaction and Each Could Contribute to Oxidative Stress in Mitochondria / F. Jordan, N. Nemeria, G. Gerfen // Neurochemical Research. — 2019. — 10. — P. 2325–2335. — DOI: 10.1007/s11064-019-02765-w

58. Zhang J. Leucine mediates autophagosome-lysosome fusion and improves sperm motility by activating the PI3K/Akt pathway / J. Zhang, X. Zhang, Y. Liu et al. // Oncotarget. — 2017. — 67. — P. 111807–111818. — DOI: 10.18632/oncotarget.22910

59. Miura N. Subchronic Tolerance Trials of Graded Oral Supplementation with Phenylalanine or Serine in Healthy Adults / N. Miura, H. Matsumoto, L. Cynober et al. // Nutrients. — 2021. — 6. — P. 1976. — DOI: 10.3390/nu13061976

60. Brodnik Z.D. L-Tyrosine availability affects basal and stimulated catecholamine indices in prefrontal cortex and striatum of the rat / Z.D. Brodnik, M. Double, R.A. España et al. // Neuropharmacology. — 2017. — 123. — P. 159–174. — DOI: 10.1016/j.neuropharm.2017.05.030

61. Garibotto G. Effects of Low-Protein, and Supplemented Very Low-Protein Diets, on Muscle Protein Turnover in Patients With CKD / G. Garibotto, A. Sofia, E.I. Parodi et al. // Kidney International Reports. — 2018. — 3. — P. 701–710. — DOI: 10.1016/j.ekir.2018.01.003

62. Matsui Y. Effect of a leucine-enriched essential amino acids mixture on muscle recovery / Y. Matsui, S. Takayanagi, T. Ohira et al. // Journal of Physical Therapy Science. — 2019. — 1. — P. 95–101. — DOI: 10.1589/jpts.31.95

63. Waskiw-Ford M. Leucine-Enriched Essential Amino Acids Improve Recovery from Post-Exercise Muscle Damage Independent of Increases in Integrated Myofibrillar Protein Synthesis in Young Men / M. Waskiw-Ford, S. Hannaian, J. Duncan et al. // Nutrients. — 2020. — 4. — P. 1061. — DOI: 10.3390/nu12041061

64. Castro A. Understanding the Relationship between Intrinsic Cardiorespiratory Fitness and Serum and Skeletal Muscle Metabolomics Profile / A. Castro, R.G. Duft, L.M. Silva et al. // Journal of Proteome Research. — 2021. — 5. — P. 2397–2409. — DOI: 10.1021/acs.jproteome.0c00905

65. Matthews J.J. The Physiological Roles of Carnosine and β-Alanine in Exercising Human Skeletal Muscle / J.J. Matthews, G.G. Artioli, M.D. Turner et al. // Medicine & Science in Sports & Exercise. — 2019. — 10. — P. 2098–2108. — DOI: 10.1249/MSS.0000000000002033

66. Fernández-Lázaro D. β-Alanine Supplementation in Combat Sports: Evaluation of Sports Performance, Perception, and Anthropometric Parameters and Biochemical Markers—A Systematic Review of Clinical Trials / D. Fernández-Lázaro, E.M. Fiandor, J.F. García et al. // Nutrients. — 2023. — 17. — P. 3755. — DOI: 10.3390/nu15173755

67. Ávila-Gandía V. One-Week High-Dose β-Alanine Loading Improves World Tour Cyclists' Time-Trial Performance / V. Ávila-Gandía, A. Torregrosa-García, S. Pérez-Piñero et al. // Nutrients. — 2021. — 8. — P. 2543. — DOI: 10.3390/nu13082543

68. Forbes S.C. Supplements and Nutritional Interventions to Augment High-Intensity Interval Training Physiological and Performance Adaptations—A Narrative Review / S.C. Forbes, D.G. Candow, A.E. Smith-Ryan et al. // Nutrients. — 2020. — 2. — P. 390. — DOI: 10.3390/nu12020390

69. Brugnara L. Muscular carnosine is a marker for cardiorespiratory fitness and cardiometabolic risk factors in men with type 1 diabetes / L. Brugnara, A.I. García, S. Murillo et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2022. — 6. — P. 1429–1440. — DOI: 10.1007/s00421-022-04929-z

70. Lievens E. CORP: quantification of human skeletal muscle carnosine concentration by proton magnetic resonance spectroscopy / E. Lievens, K. Van Vossel, F. Van de Casteele et al. // Journal of Applied Physiology. — 2021. — 1. — P. 250–264. — DOI: 10.1152/japplphysiol.00056.2021

71. Saunders B. β-Alanine supplementation to improve exercise capacity and performance: a systematic review and meta-analysis / B. Saunders, K. Elliott-Sale, G.G. Artioli // British Journal of Sports Medicine. — 2017. — 8. — P. 658–669. — DOI: 10.1136/bjsports-2016-096396

72. Georgiou G.D. Effect of Beta-Alanine Supplementation on Maximal Intensity Exercise in Trained Young Male Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis / G.D. Georgiou, K. Antoniou, S. Antoniou et al. // International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism. — 2024. — 6. — P. 397–412. — DOI: 10.1123/ijsnem.2024-0027

73. Dünnwald T. High Intensity Concentric-Eccentric Exercise Under Hypoxia Changes the Blood Metabolome of Trained Athletes / T. Dünnwald, G. Paglia, G. Weiss et al. // Frontiers in Physiology. — 2022. — 13. — P. 904618. — DOI: 10.3389/fphys.2022.904618

74. Campbell M.D. Age-related changes of skeletal muscle metabolic response to contraction are also sex-dependent / M.D. Campbell, D. Djukovic, D. Raftery et al. // The Journal of Physiology. — 2025. — 1. — P. 69–86. — DOI: 10.1113/JP285124

75. Cai X. α-ketoglutarate prevents skeletal muscle protein degradation and muscle atrophy through PHD3/ADRB2 pathway / X. Cai, Y. Yuan, Z. Liao et al. // The FASEB Journal. — 2018. — 2. — P. 488–499. — DOI: 10.1096/fj.201700670R

76. Gyanwali B. Alpha-Ketoglutarate Dietary Supplementation to Improve Health in Humans / B. Gyanwali, Z.X. Lim, J. Soh et al. // Trends in Endocrinology & Metabolism. — 2022. — 2. — P. 136–146. — DOI: 10.1016/j.tem.2021.11.003

 © Авторы статьи / Authors of the article

77. Wu D. Low Protein Diets Supplemented with Alpha-Ketoglutarate Enhance the Growth Performance, Immune Response, and Intestinal Health in Common Carp (Cyprinus carpio) / D. Wu, Z. Fan, J. Li et al. // Frontiers in Immunology. — 2022. — 13. — P. 915657. — DOI: 10.3389/fimmu.2022.915657

78. Naeini S.H. Alpha-Ketoglutarate as a Potent Regulator for Lifespan and Healthspan: Evidences and Perspectives / S.H. Naeini, L. Mavaddatiyan, Z.R. Kalkhoran et al. // Experimental Gerontology. — 2023. — 175. — P. 112154. — DOI: 10.1016/j.exger.2023.112154

79. Zhao L. Effects of Low-Protein Diet Supplementation with Alpha-Ketoglutarate on Growth Performance, Nitrogen Metabolism and mTOR Signalling Pathway of Skeletal Muscle in Piglets / L. Zhao, H. Guo, H. Sun // Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. — 2020. — 1. — P. 300–309. — DOI: 10.1111/jpn.13230

80. Nijholt K.T. Exercise: A Molecular Tool to Boost Muscle Growth and Mitochondrial Performance in Heart Failure / K.T. Nijholt, P.I. Sánchez-Aguilera, S.N. Voorrips et al. // European Journal of Heart Failure. — 2022. — 2. — P. 287–298. — DOI: 10.1002/ejhf.2407

81. Xu M. Impact of Alpha-Ketoglutarate on Skeletal Muscle Health and Exercise Performance: A Narrative Review / M. Xu, Q. Zhang, X. Liu et al. // Nutrients. — 2024. — 22. — P. 3968. — DOI: 10.3390/nu16223968

82. Yuan Y. Exercise-induced α-ketoglutaric acid stimulates muscle hypertrophy and fat loss through OXGR1-dependent adrenal activation / Y. Yuan, P. Xu, Q. Jiang et al. // The EMBO Journal. — 2020. — 7. — P. e103304. — DOI: 10.15252/embj.2019103304

83. Yuan Y. α-Ketoglutaric acid ameliorates hyperglycemia in diabetes by inhibiting hepatic gluconeogenesis via serpina1e signaling / Y. Yuan, C. Zhu, Y. Wang et al. // Science Advances. — 2022. — 18. — P. eabn2879. — DOI: 10.1126/sciadv.abn2879

84. Qi J. Exercise Training Attenuates Hypertension Through TLR4/MyD88/NF-κB Signaling in the Hypothalamic Paraventricular Nucleus / J. Qi, X.J. Yu, L.Y. Fu et al. // Frontiers in Neuroscience. — 2019. — 13. — P. 1138. — DOI: 10.3389/fnins.2019.01138

85. Tauler P. Antioxidant response and oxidative damage induced by a swimming session: Influence of gender / P. Tauler, M.D. Ferrer, D. Romaguera et al. // Journal of Sports Sciences. — 2008. — 2. — P. 1303–1311. — DOI: 10.1080/02640410801974992

86. Kong F. The Metabolome Characteristics of Aerobic Endurance Development in Adolescent Male Rowers Using Polarized and Threshold Model: An Original Research / F. Kong, M. Zhu, X. Pan et al. // Metabolites. — 2025. — 1. — P. 17. — DOI: 10.3390/metabo15010017

87. Davison G. Metabolomic Response to Acute Hypoxic Exercise and Recovery in Adult Males / G. Davison, M. Vinaixa, R. McGovern et al. // Frontiers in Physiology. — 2018. — 9. — P. 1682. — DOI: 10.3389/fphys.2018.01682

88. Antonioni A. Redox homeostasis in sport: do athletes really need antioxidant support? / A. Antonioni, C. Fantini, L. Dimauro et al. // Research in Sports Medicine. — 2019. — 2. — P. 147–165. — DOI: 10.1080/15438627.2018.1563899

89. Medoro A. Omega-3 Index as a Sport Biomarker: Implications for Cardiovascular Health, Injury Prevention, and Athletic Performance / A. Medoro, A. Buonsenso, M. Centorbi et al. // Journal of Functional Morphology and Kinesiology. — 2024. — 2. — P. 91. — DOI: 10.3390/jfmk9020091

90. Lu Y. Effects of High Intensity Exercise on Oxidative Stress and Antioxidant Status in Untrained Humans: A Systematic Review / Y. Lu, H.D. Wiltshire, J.S. Baker et al. // Biology. — 2021. — 12. — P. 1272. — DOI: 10.3390/biology10121272

91. Daniels M. Comparative analysis of circulating metabolomic profiles identifies shared metabolic alterations across distinct multistressor military training exercises / M. Daniels, L.M. Margolis, J.C. Rood et al. // Physiological Genomics. — 2024. — 7. — P. 457–468. — DOI: 10.1152/physiolgenomics.00008.2024

92. Cai M. Blood Metabolomics Analysis Identifies Differential Serum Metabolites in Elite and Sub-elite Swimmers / M. Cai, C. Wu, C. Jing et al. // Frontiers in Physiology. — 2022. — 13. — P. 858869. — DOI: 10.3389/fphys.2022.858869

93. Bestwick-Stevenson T. Assessment of Fatigue and Recovery in Sport: Narrative Review / T. Bestwick-Stevenson, R. Toone, E. Neupert et al. // International Journal of Sports Medicine. — 2022. — 14. — P. 1151–1162. — DOI: 10.1055/a-1834-7177

94. Pedlar C.R. Blood Biomarker Profiling and Monitoring for High-Performance Physiology and Nutrition: Current Perspectives, Limitations and Recommendations / C.R. Pedlar, J. Newell, N.A. Lewis // Sports Medicine. — 2019. — 49. — P. 185–198. — DOI: 10.1007/s40279-019-01158-x

95. la Torre M.E. The Potential Role of Nutrition in Overtraining Syndrome: A Narrative Review / M.E. la Torre, A. Monda, A. Messina et al. // Nutrients. — 2023. — 23. — P. 4916. — DOI: 10.3390/nu15234916

96. Howe C. Untargeted Metabolomics Profiling of an 80.5 km Simulated Treadmill Ultramarathon / C. Howe, A. Alshehri, D. Muggeridge et al. // Metabolites. — 2018. — 1. — P. 14. — DOI: 10.3390/metabo8010014

97. Trushina E.N. The efficiency of branched chain aminoacids (BCAA) in the nutrition of combat sport athletes / E.N. Trushina, V.D. Vybornov, N.A. Riger et al. // Voprosy pitalia [Nutrition Issues]. — 2019. — 4. — P. 48–56. — DOI: 10.24411/0042-8833-2019-10041

98. Jansson D. Hormonal and inflammatory responses in prepubertal vs. pubertal male children following an acute free-weight resistance training session / D. Jansson, E. Lundberg, A.C. Rullander et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2025. — 2. — P. 381–392. — DOI: 10.1007/s00421-024-05603-2

99. Sekine Y. Maturity-Associated Variations in Resistance Exercise-Induced Hormonal Responses in Young Male Athletes / Y. Sekine, N. Hirose // Pediatric Exercise Science. — 2022. — 1. — P. 28–35. — DOI: 10.1123/pes.2020-0170

100. Guth L.M. Carbohydrate consumption and variable-intensity exercise responses in boys and men / L.M. Guth, M.P. Rogowski, J.P. Guilkey et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2019. — 4. — P. 1019–1027. — DOI: 10.1007/s00421-019-04091-z

 © Авторы статьи / Authors of the article

101. Jesuthasan A. Assessment of Changes in Physiological Markers in Different Body Fluids at Rest and after Exercise / A. Jesuthasan, A. Ali, J.K.W. Lee et al. // Nutrients. — 2022. — 21. — P. 4685. — DOI: 10.3390/nu14214685

102. Gharahdaghi N. Links Between Testosterone, Oestrogen, and the Growth Hormone/Insulin-Like Growth Factor Axis and Resistance Exercise Muscle Adaptations / N. Gharahdaghi, B.E. Phillips, N.J. Szewczyk et al. // Frontiers in Physiology. — 2021. — 11. — P. 621226. — DOI: 10.3389/fphys.2020.621226

103. Kraemer W.J. Growth Hormone(s), Testosterone, Insulin-Like Growth Factors, and Cortisol: Roles and Integration for Cellular Development and Growth With Exercise / W.J. Kraemer, N.A. Ratamess, W.C. Hymer et al. // Frontiers in Endocrinology. — 2020. — 11. — P. 33. — DOI: 10.3389/fendo.2020.00033

104. Geisler S. Salivary testosterone and cortisol concentrations after two different resistance training exercises / S. Geisler, T. Aussieker, S. Paldauf et al. // The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness. — 2019. — 6. — P. 1030–1035. — DOI: 10.23736/S0022-4707.18.08786-8

105. Taipale R.S. Active and passive recovery influence responses of luteinizing hormone and testosterone to a fatiguing strength loading / R.S. Taipale, H. Kyröläinen, S.S. Gagnon et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2018. — 1. — P. 123–131. — DOI: 10.1007/s00421-017-3753-3

106. Yeom D.C. Effects of Low-Load, High-Repetition Resistance Training on Maximum Muscle Strength and Muscle Damage in Elite Weightlifters: A Preliminary Study / D.C. Yeom, D.J. Hwang, W.B. Lee et al. // International Journal of Molecular Sciences. — 2023. — 23. — P. 17079. — DOI: 10.3390/ijms242317079

107. Crewther B.T. Associations between the Big Five personality traits, testosterone, and cortisol in adolescent male athletes / B.T. Crewther, Z. Obmiński, D. Turowski et al. // Biology of Sport. — 2024. — 1. — P. 279–286. — DOI: 10.5114/biolsport.2024.127390

108. Gharahdaghi N. Testosterone therapy induces molecular programming augmenting physiological adaptations to resistance exercise in older men / N. Gharahdaghi, S. Rudrappa, M.S. Brook et al. // Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle. — 2019. — 6. — P. 1276–1294. — DOI: 10.1002/jcsm.12472

109. Hooper D.R. The presence of symptoms of testosterone deficiency in the exercise-hypogonadal male condition and the role of nutrition / D.R. Hooper, W.J. Kraemer, C. Saenz et al. // European Journal of Applied Physiology. — 2017. — 7. — P. 1349–1357. — DOI: 10.1002/jcsm.12472

110. Kasper A.M. Case Study: Extreme Weight Making Causes Relative Energy Deficiency, Dehydration and Acute Kidney Injury in a Male Mixed Martial Arts Athlete / A.M. Kasper, B. Crighton, C. Langan-Evans et al. // International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism. — 2019. — 3. — P. 331–338. — DOI: 10.1123/ijsnem.2018-0029

111. Costache A.D. Beyond the Finish Line: The Impact and Dynamics of Biomarkers in Physical Exercise—A Narrative Review / A.D. Costache, I.I. Costache, R.Ș. Miftode et al. // Journal of Clinical Medicine. — 2021. — 21. — P. 4978. — DOI: 10.3390/jcm10214978

112. Jörres M. Physiological Changes, Activity, and Stress During a 100-km-24-h Walking-March / M. Jörres, H.C. Gunga, M. Steinach // Frontiers in Physiology. — 2021. — 12. — P. 640710. — DOI: 10.3389/fphys.2021.640710

113. Moore T.M. The impact of exercise on mitochondrial dynamics and the role of Drp1 in exercise performance and training adaptations in skeletal muscle / T.M. Moore, Z. Zhou, W. Cohn et al. // Molecular Metabolism. — 2019. — 21. — P. 51–67. — DOI: 10.1016/j.molmet.2018.11.012

114. Taylor D.F. Transcription Factor Movement and Exercise-Induced Mitochondrial Biogenesis in Human Skeletal Muscle: Current Knowledge and Future Perspectives / D.F. Taylor, D.J. Bishop // International Journal of Molecular Sciences. — 2022. — 3. — P. 1517. — DOI: 10.3390/ijms23031517

115. Dohlmann T.L. High-intensity interval training changes mitochondrial respiratory capacity differently in adipose tissue and skeletal muscle / T.L. Dohlmann, M. Hindsø, F. Dela et al. // Physiological Reports. — 2018. — 18. — P. e13857. — DOI: 10.14814/phy2.13857

116. Cadegiani F.A. Novel Markers of Recovery From Overtraining Syndrome: The EROS-LONGITUDINAL Study / F.A. Cadegiani, P.H.L. Silva, T.C.P. Abrao et al. // International Journal of Sports Physiology and Performance. — 2021. — 8. — P. 1175–1184. — DOI: 10.1123/ijspp.2020-0248

117. Carrard J. Diagnosing Overtraining Syndrome: A Scoping Review / J. Carrard, A.C. Rigort, C. Appenzeller-Herzog et al. // Sports Health. — 2022. — 5. — P. 665–673. — DOI: 10.1177/19417381211044739

118. Liax V.I. Mirovy'e tendencii razvitiya sistemy' fizicheskogo vospitaniya v obshheobrazovatel'noj shkole [World trends in the development of the physical education system in comprehensive schools] / V.I. Liax, S.P. Levushkin, V.D. Son'kin // Science and Sport: Modern Tendencies. — 2019. — 22. — P. 12–19. [in Russian]

119. Malsagova K.A. Molecular Profiling of Athletes Performing High-Intensity Exercises in Extreme Environments / K.A. Malsagova, A.T. Kopylov, A.A. Stepanov et al. // Sports. — 2023. — 2. — P. 36. — DOI: 10.3390/sports11020036