

РОЛЬ МИТОХОНДРИАЛЬНОГО БИОГЕНЕЗА В РАЗВИТИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ВАТЕРПОЛИСТОВ

Джомаладинова Зарина Рустемовна

*Наманганский Государственный Педагогический Институт
Факультет Социальных наук Кафедра - Теории и методики физической
культуры и спорта. Студентка базовой докторантуры 1 курса, кафедры
физической культуры и спорта
E-mail: dzhomaladinova@gmail.com*

Аннотация: В статье рассматривается роль митохондриального биогенеза в развитии специальной выносливости ватерполистов. Актуальность исследования обусловлена тем, что соревновательная деятельность в водном поло характеризуется высокой интенсивностью, интервальным характером нагрузки, контактным противоборством и необходимостью многократного выполнения технических и тактических действий в условиях нарастающего утомления. Цель статьи — теоретически обосновать значение митохондриального биогенеза как клеточного механизма, обеспечивающего повышение специальной выносливости ватерполистов. В работе использованы методы анализа, обобщения и систематизации научно-методической литературы по физиологии спорта, биоэнергетике мышечной деятельности, митохондриальной адаптации и теории спортивной тренировки. Установлено, что митохондриальный биогенез способствует повышению окислительной способности скелетных мышц, ускорению ресинтеза АТФ и фосфокреатина, улучшению утилизации лактата и восстановлению между повторными высокоинтенсивными игровыми действиями. Сделан вывод о том, что развитие специальной выносливости ватерполистов должно основываться на применении высокоинтенсивных интервальных, повторно-спринтерских и технически сопряжённых упражнений, способных стимулировать митохондриальные адаптации и повышать устойчивость спортсменов к соревновательному утомлению.

Ключевые слова: водное поло, ватерполисты, специальная выносливость, митохондриальный биогенез, митохондриальная адаптация, PGC-1 α , лактатный обмен, утомление.

THE ROLE OF MITOCHONDRIAL BIOGENESIS IN THE DEVELOPMENT OF SPECIFIC ENDURANCE IN WATER POLO PLAYERS

Zarina Dzhomaladinova

*Namangan State Pedagogical Institute Faculty of Social Sciences
Department of Theory and Methodology of Physical Education and Sport
1st-year Basic Doctoral Student of the Department of Physical Education and Sport*

Abstract: *The article examines the role of mitochondrial biogenesis in the development of specific endurance in water polo players. The relevance of the study is determined by the fact that competitive activity in water polo is characterized by high intensity, intermittent loads, physical contact, and the repeated performance of technical and tactical actions under increasing fatigue. The aim of the article is to theoretically substantiate the importance of mitochondrial biogenesis as a cellular mechanism that contributes to the improvement of specific endurance in water polo players. The study uses the methods of analysis, generalization, and systematization of scientific and methodological literature on sports physiology, muscle bioenergetics, mitochondrial adaptation, and sports training theory. It is established that mitochondrial biogenesis contributes to increased oxidative capacity of skeletal muscles, faster ATP and phosphocreatine resynthesis, improved lactate utilization, and more effective recovery between repeated high-intensity game actions. The article concludes that the development of specific endurance in water polo players should be based on high-intensity interval, repeated-sprint, and technically integrated exercises that can stimulate mitochondrial adaptations and improve athletes' resistance to competitive fatigue.*

Keywords: *water polo, water polo players, specific endurance, mitochondrial biogenesis, mitochondrial adaptation, PGC-1 α , lactate metabolism, fatigue.*

VATERPOLCHILARDA MAXSUS CHIDAMLILIKNI RIVOJLANTIRISHDA MITOXONDRIAL BIOGENEZNING ROLI

Djomaladinova Zarina Rustemovna

Namangan Davlat Pedagogika Instituti Ijtimoiy fanlar fakulteti

Jismoniy tarbiya va sport nazariyasi va metodikasi kafedrası

Jismoniy tarbiya va sport kafedrasining 1-bosqich tayanch doktoranti –

Annotatsiya: *Maqolada vaterpolchilarda maxsus chidamlilikni rivojlantirishda mitoxondrial biogeneznining roli ko'rib chiqiladi. Tadqiqotning dolzarbligi shundaki, suv polosi musobaqa faoliyati yuqori shiddat, intervalli yuklama, jismoniy qarshilik hamda ortib boruvchi charchoq sharoitida texnik va taktik harakatlarni takroran bajarish zarurati bilan tavsiflanadi. Maqolaning maqsadi mitoxondrial biogeneznining vaterpolchilarda maxsus chidamlilikni oshirishga xizmat qiluvchi hujayravii mexanizm sifatidagi ahamiyatini nazariy jihatdan asoslashdan iborat. Ishda sport fiziologiyasi, mushak faoliyati bioenergetikasi, mitoxondrial moslashuv va sport mashg'ulotlari nazariyasiga oid ilmiy-uslubiy adabiyotlarni tahlil qilish, umumlashtirish va tizimlashtirish usullaridan foydalanildi. Aniqlanishicha, mitoxondrial biogenez skelet mushaklarining oksidlanish qobiliyatini oshirish, ATF va fosfokreatin resintezini tezlashtirish, laktatdan foydalanishni yaxshilash hamda takroriy yuqori shiddatli o'yin harakatlari orasida tiklanishni samaraliroq ta'minlashga yordam beradi. Maqolada vaterpolchilarda maxsus chidamlilikni rivojlantirish yuqori shiddatli intervalli, takroriy sprint va texnik jihatdan uyg'unlashtirilgan mashqlar asosida tashkil etilishi zarurligi asoslab beriladi. Bunday mashqlar mitoxondrial moslashuvlarni rag'batlantirib, sportchilarning musobaqaviy charchoqqa chidamliligini oshirishga xizmat qiladi.*

Kalit soʻzlar: *suv polosi, vaterpolchilar, maxsus chidamlilik, mitoxondrial biogenez, mitoxondrial moslashuv, PGC-1 α , laktat almashinuvi, charchoq.*

ВВЕДЕНИЕ

Водное поло относится к числу наиболее энергоёмких игровых видов спорта, в которых спортивный результат определяется не только уровнем технической и тактической подготовленности, но и способностью спортсмена многократно выполнять интенсивные двигательные действия в условиях нарастающего утомления. В ходе соревновательной деятельности ватерполист выполняет ускорения, рывки, резкие изменения направления движения, борьбу за позицию, удержание вертикального положения тела, передачи, броски, блокирование и возвращение в защиту. Такая структура нагрузки требует постоянного взаимодействия аэробных и анаэробных механизмов энергообеспечения, а также высокой способности организма к восстановлению между повторяющимися игровыми эпизодами [1; 2].

В научной литературе специальная выносливость рассматривается как одно из ключевых физических качеств, обеспечивающих устойчивость работоспособности спортсмена в условиях специфической соревновательной деятельности. В. Н. Платонов подчёркивает, что в системе многолетней спортивной подготовки выносливость не может рассматриваться только как способность длительно выполнять физическую работу; её содержание зависит от структуры соревновательной деятельности, характера мышечной работы, энергетического обеспечения и требований конкретного вида спорта [3]. Л. П. Матвеев также отмечает, что специальная выносливость формируется в тесной связи с техникой, тактикой и функциональной подготовленностью спортсмена [4]. Для водного поло это положение имеет принципиальное значение, поскольку ватерполист должен сохранять не только двигательную активность, но и точность технических действий, быстроту принятия решений и эффективность взаимодействия с партнёрами в условиях утомления.

Физиологические особенности водного поло подробно рассматривались Н. К. Smith, который характеризовал данный вид спорта как деятельность с выраженными требованиями к плавательной подготовленности, мышечной силе,

мощности, специальной выносливости и способности переносить высокую физиологическую нагрузку [1]. Эти данные подтверждают, что в водном поло важна не только способность выполнить отдельное мощное действие, но и способность многократно повторять такие действия с минимальным снижением скорости, силы и технической эффективности.

Однако значительная часть исследований по подготовке ватерполистов традиционно сосредоточена на внешних показателях физической работоспособности: скорости плавания, повторной спринтерской способности, частоте сердечных сокращений, лактатной реакции, объёме и интенсивности тренировочной нагрузки. Такой подход является важным, но недостаточным для глубокого понимания механизмов развития специальной выносливости. Современная физиология спорта всё больше обращается к клеточно-молекулярному уровню адаптации, где особое место занимают митохондрии скелетных мышц, митохондриальный биогенез, окислительная способность мышечной ткани и регуляторные белки, связанные с энергетическим обменом [5; 6].

Митохондрии являются основными внутриклеточными органеллами, обеспечивающими аэробное образование аденозинтрифосфата — АТФ, необходимого для мышечного сокращения. При систематических тренировочных воздействиях в скелетных мышцах происходят адаптационные изменения, связанные с увеличением количества и функциональной активности митохондрий, повышением активности окислительных ферментов, улучшением использования кислорода и более эффективным восстановлением энергетических ресурсов. Ещё в классических работах J. O. Holloszy было показано, что тренировка на выносливость вызывает выраженные биохимические изменения в скелетных мышцах, включая повышение митохондриальной окислительной способности [5]. Эти положения стали фундаментом для дальнейшего изучения митохондриальных адаптаций в спорте.

Одним из центральных механизмов, объясняющих развитие митохондриальной адаптации под влиянием физических упражнений, является

митохондриальный биогенез. Под митохондриальным биогенезом понимается процесс образования новых митохондрий и повышения функциональной мощности уже существующих митохондриальных структур. В спортивной деятельности этот процесс имеет непосредственное значение, так как он связан с повышением аэробной мощности, ускорением восстановления, улучшением утилизации лактата и повышением устойчивости мышц к повторяющимся интенсивным нагрузкам. Для ватерполистов это особенно важно, поскольку игра требует постоянного чередования взрывных действий и коротких периодов восстановления.

Важную роль в регуляции митохондриального биогенеза играет коактиватор PGC-1 α . В исследованиях Р. Puigserver и соавторов было показано, что PGC-1 участвует в регуляции транскрипционных программ, связанных с энергетическим обменом и митохондриальной функцией [6]. Позднее J. P. Little и соавторы установили, что даже один сеанс высокоинтенсивной интервальной тренировки может активировать механизмы митохондриального биогенеза через увеличение ядерного содержания PGC-1 α в скелетных мышцах человека [7]. Для теории подготовки ватерполистов этот факт имеет большое значение, поскольку высокоинтенсивные интервальные нагрузки по своей структуре близки к соревновательной деятельности в водном поло.

Исследования С. Granata, J. P. Little, D. J. Bishop и соавторов показали, что интенсивность тренировочной нагрузки является важным фактором, влияющим на изменения PGC-1 α , p53 и митохондриального дыхания в скелетных мышцах человека [8]. Это позволяет предположить, что для развития специальной выносливости ватерполистов недостаточно применять только равномерные аэробные нагрузки. Необходимы тренировочные средства, которые создают контролируемый энергетический стресс: повторные ускорения, интервальное плавание высокой интенсивности, игровые упражнения с ограничением времени, технические действия после физической нагрузки и малые игровые формы. Именно такие средства могут способствовать не только внешнему повышению работоспособности, но и более глубоким клеточным адаптациям.

Особое значение для водного поло имеет проблема лактатного обмена. Ранее лактат часто рассматривался преимущественно как продукт утомления. Однако современные представления, развиваемые G. A. Brooks в рамках концепции lactate shuttle, показывают, что лактат является не только маркером интенсивной работы, но и важным энергетическим субстратом, который может использоваться различными тканями, включая скелетные мышцы и сердце [9]. С этой позиции развитие специальной выносливости ватерполистов должно быть связано не только с «терпимостью к лактату», но и со способностью организма эффективно транспортировать, окислять и использовать лактат в условиях повторяющихся высокоинтенсивных нагрузок.

В условиях матча ватерполист постоянно сталкивается с ситуациями, когда очередное техническое действие необходимо выполнить на фоне неполного восстановления. Например, после рывка, борьбы за позицию или активного защитного эпизода спортсмен должен быстро выполнить передачу, бросок или тактическое перемещение. Если митохондриальная система недостаточно развита, восстановление фосфокреатина замедляется, окисление метаболитов ухудшается, а мышечная координация быстрее нарушается. В результате снижается точность бросков, ухудшается качество передач, увеличивается количество технических ошибок и снижается общая эффективность игровых действий. Следовательно, митохондриальный биогенез можно рассматривать как один из клеточных механизмов, обеспечивающих устойчивость технико-тактической деятельности ватерполистов в условиях соревновательного утомления.

Несмотря на наличие исследований, посвящённых физиологии водного поло, повторной спринтерской способности и аэробно-анаэробной подготовленности ватерполистов, роль митохондриального биогенеза в развитии специальной выносливости представителей данного вида спорта изучена недостаточно. В большинстве работ специальная выносливость описывается на уровне педагогических средств, тренировочных методов и функциональных показателей. При этом клеточные механизмы адаптации скелетных мышц, включая роль митохондрий, PGC-1 α -зависимых сигнальных путей,

окислительной мощности и лактатного обмена, редко рассматриваются применительно к специфике водного поло.

Таким образом, актуальность настоящей статьи определяется необходимостью теоретического обоснования специальной выносливости ватерполистов не только как педагогического и физиологического качества, но и как результата клеточно-молекулярных адаптаций скелетных мышц. Рассмотрение митохондриального биогенеза как одного из ведущих механизмов развития специальной выносливости позволяет глубже раскрыть биологические основы тренировочного процесса и определить более научно обоснованные направления подготовки ватерполистов на этапе углублённой специализации.

Цель статьи — теоретически обосновать роль митохондриального биогенеза в развитии специальной выносливости ватерполистов.

Для достижения цели были определены следующие задачи: раскрыть значение митохондрий в энергетическом обеспечении соревновательной деятельности ватерполистов; проанализировать роль митохондриального биогенеза и PGC-1 α в адаптации скелетных мышц к высокоинтенсивным нагрузкам; определить связь митохондриальных адаптаций с восстановлением, лактатным обменом и устойчивостью к утомлению; обосновать перспективность применения специфических интервальных и технически сопряжённых тренировочных средств для развития специальной выносливости ватерполистов.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование носит теоретико-аналитический характер и направлено на обоснование роли митохондриального биогенеза в развитии специальной выносливости ватерполистов. Выбор данной методологии обусловлен тем, что проблема специальной выносливости в водном поло чаще рассматривается на уровне внешних показателей физической работоспособности, тогда как клеточно-молекулярные механизмы адаптации скелетных мышц, в частности митохондриальный биогенез, требуют более глубокого теоретического анализа.

В качестве методологической основы исследования использовались положения теории спортивной тренировки, физиологии мышечной деятельности, биоэнергетики физических упражнений и современных

представлений о митохондриальной адаптации скелетных мышц к тренировочным нагрузкам. Особое внимание уделялось научным трудам, в которых раскрываются закономерности развития выносливости спортсменов, физиологические требования водного поло, повторная спринтерская способность, роль аэробных и анаэробных механизмов энергообеспечения, а также регуляторные механизмы митохондриального биогенеза [1; 2; 5; 7; 8].

В процессе исследования были использованы следующие методы:

1. Теоретический анализ научной литературы. Данный метод применялся для изучения работ, посвящённых специальной выносливости спортсменов, физиологии водного поло, энергетическому обеспечению мышечной деятельности и клеточным механизмам адаптации к физическим нагрузкам. Анализ позволил выявить, что специальная выносливость ватерполистов определяется не только уровнем аэробной и анаэробной подготовленности, но и способностью мышечной ткани адаптироваться к повторным высокоинтенсивным нагрузкам через повышение митохондриальной функции.

2. Сравнительно-сопоставительный анализ. Этот метод использовался для сопоставления традиционных представлений о развитии специальной выносливости с современными данными о роли митохондрий, PGC-1 α , окислительного метаболизма и лактатного обмена. Сравнение позволило определить, что педагогические методы развития выносливости должны рассматриваться не только с позиции внешней тренировочной нагрузки, но и с позиции внутренних клеточных адаптаций.

3. Обобщение и систематизация научных данных. На основе анализа отечественных и зарубежных источников были систематизированы основные биоэнергетические и клеточно-молекулярные факторы, связанные с развитием специальной выносливости ватерполистов. К ним были отнесены: митохондриальный биогенез, повышение окислительной способности скелетных мышц, активность регуляторных белков PGC-1 α , AMPK и p38 MAPK, эффективность лактатного обмена, скорость восстановления фосфокреатина и устойчивость мышечной ткани к повторному энергетическому стрессу.

4. Логико-теоретическое моделирование. Данный метод применялся для построения теоретической модели взаимосвязи между соревновательной деятельностью ватерполистов, специальной выносливостью и митохондриальными адаптациями скелетных мышц. В рамках данной модели предполагается, что высокоинтенсивные интервальные и технически сопряжённые нагрузки в водном поло создают энергетический стресс, который активирует внутриклеточные сигнальные пути, связанные с митохондриальным биогенезом. В результате повышается способность организма к аэробному ресинтезу АТФ, ускоряется восстановление между повторными игровыми действиями и повышается устойчивость спортсмена к утомлению.

5. Интерпретационный метод. Этот метод использовался для объяснения данных физиологических исследований применительно к специфике водного поло. Поскольку большинство работ по митохондриальному биогенезу выполнено на материале циклических видов спорта или лабораторных моделей высокоинтенсивной интервальной тренировки, возникла необходимость интерпретировать эти данные с учётом особенностей водного поло: переменной интенсивности нагрузки, контактного противоборства, вертикального положения тела в воде, повторных ускорений и необходимости сохранять технико-тактическую эффективность в условиях утомления.

Материалом исследования послужили научные публикации, учебники и монографии по следующим направлениям: теория и методика спортивной тренировки, физиология спорта, биоэнергетика мышечной деятельности, водное поло, повторная спринтерская способность, митохондриальный биогенез и лактатный обмен. При отборе источников учитывались их научная значимость, соответствие теме исследования, наличие данных о физиологических механизмах выносливости и возможность их применения к подготовке ватерполистов.

В исследование были включены работы, раскрывающие:

- физиологические требования соревновательной деятельности в водном поло;

- особенности проявления специальной выносливости у ватерполистов;
- роль аэробной и анаэробной систем энергообеспечения;
- значение повторной спринтерской способности для игровых видов спорта;
- механизмы митохондриального биогенеза;
- роль PGC-1 α и связанных сигнальных путей в адаптации скелетных мышц;
- значение лактата как метаболита и энергетического субстрата;
- влияние высокоинтенсивной интервальной тренировки на митохондриальную функцию.

Критериями включения источников в анализ являлись: соответствие теме исследования, научная достоверность, связь с физиологией спорта или спортивной тренировкой, наличие данных о выносливости, энергетическом обмене, митохондриальной адаптации или специфике водного поло. Источники, не имеющие прямой связи с проблемой специальной выносливости, мышечной биоэнергетики или тренировочной адаптации, не рассматривались как основные.

Методологическая логика исследования строилась по следующей последовательности. На первом этапе были проанализированы особенности соревновательной деятельности в водном поло и определены основные требования к специальной выносливости ватерполистов. На втором этапе были рассмотрены физиологические механизмы энергообеспечения мышечной деятельности, включая аэробные и анаэробные процессы. На третьем этапе изучались клеточно-молекулярные механизмы адаптации скелетных мышц, прежде всего митохондриальный биогенез и роль PGC-1 α . На четвертом этапе была обоснована связь митохондриальной адаптации с устойчивостью ватерполистов к соревновательному утомлению. На пятом этапе были сформулированы педагогические выводы для построения тренировочного процесса, направленного на развитие специальной выносливости.

Особое внимание в методологии исследования уделялось принципу междисциплинарного анализа. Проблема специальной выносливости ватерполистов рассматривалась на трёх взаимосвязанных уровнях:

1. Педагогический уровень — подбор тренировочных средств, методов, объёма и интенсивности нагрузки.
2. Физиологический уровень — работа сердечно-сосудистой, дыхательной и мышечной систем при повторных высокоинтенсивных действиях.
3. Клеточно-молекулярный уровень — митохондриальный биогенез, окислительный метаболизм, PGC-1 α -зависимые механизмы, лактатный обмен и восстановление энергетических ресурсов.

Такой подход позволяет рассматривать специальную выносливость ватерполистов не только как результат тренировочной нагрузки, но и как проявление глубинных адаптационных процессов в скелетных мышцах. Это особенно важно для водного поло, где спортсмен должен многократно выполнять интенсивные игровые действия и одновременно сохранять техническую точность, тактическое мышление и двигательную координацию.

Таким образом, методология исследования основана на комплексном теоретическом анализе научных данных о специальной выносливости, биоэнергетике мышечной деятельности и митохондриальной адаптации. Использование данной методологии позволяет научно обосновать роль митохондриального биогенеза как одного из ключевых клеточных механизмов развития специальной выносливости ватерполистов и определить перспективные направления дальнейшего экспериментального исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ

Поскольку данное исследование имеет теоретико-аналитический характер, полученные результаты основаны не на собственном педагогическом эксперименте, а на анализе, сопоставлении и систематизации научных данных по физиологии водного поло, спортивной биоэнергетике, митохондриальной адаптации и развитию специальной выносливости спортсменов. В результате анализа установлено, что митохондриальный биогенез может рассматриваться

как один из ключевых клеточных механизмов, обеспечивающих развитие специальной выносливости ватерполистов.

1. Специальная выносливость ватерполистов имеет многоуровневую природу

Анализ научной литературы показал, что специальная выносливость ватерполистов не ограничивается способностью длительно выполнять плавательную работу. В условиях соревновательной деятельности она проявляется как способность спортсмена многократно выполнять интенсивные игровые действия, сохранять техническую точность, быстро восстанавливаться между эпизодами нагрузки и противостоять нарастающему утомлению.

В водном поло спортсмены постоянно чередуют различные виды мышечной работы: горизонтальное плавание, ускорения, вертикальное удержание тела, борьбу за позицию, бросковые действия, блокирование и активные перемещения в защите. Поэтому специальная выносливость ватерполиста формируется на трёх взаимосвязанных уровнях:

1. педагогическом — через подбор специальных тренировочных средств и методов;
2. физиологическом — через развитие аэробной и анаэробной работоспособности;
3. клеточно-молекулярном — через митохондриальные адаптации скелетных мышц, повышение окислительной способности и улучшение энергетического обмена.

Таким образом, специальная выносливость ватерполиста должна рассматриваться не только как физическое качество, но и как результат глубоких адаптационных процессов, происходящих в мышечной ткани под влиянием систематической тренировочной нагрузки [1; 3; 4].

2. Митохондриальный биогенез является основой повышения окислительной способности мышц

Одним из центральных результатов теоретического анализа является положение о том, что митохондриальный биогенез обеспечивает повышение энергетической устойчивости скелетных мышц ватерполистов.

Митохондриальный биогенез представляет собой процесс увеличения количества митохондрий и повышения их функциональной активности. В спортивной деятельности это связано с более эффективным образованием АТФ, улучшением использования кислорода, ускорением восстановления и снижением выраженности утомления.

Классические исследования J. O. Holloszy и F. W. Booth показали, что тренировка на выносливость вызывает выраженные биохимические изменения в скелетных мышцах, включая повышение активности окислительных ферментов и увеличение митохондриальной мощности [5]. Эти данные позволяют рассматривать митохондрии как важнейшее звено в развитии выносливости спортсменов.

Для ватерполистов значение митохондриального биогенеза проявляется особенно ярко, потому что во время игры спортсмен должен не просто длительно работать, а многократно восстанавливаться после интенсивных действий. Чем выше функциональная мощность митохондрий, тем быстрее происходит аэробный ресинтез АТФ, восстановление фосфокреатина и утилизация продуктов интенсивного обмена.

Следовательно, развитие митохондриального аппарата мышц является важной предпосылкой сохранения высокой игровой активности на протяжении всего матча.

3. PGC-1 α выступает одним из ведущих регуляторов митохондриальной адаптации

В результате анализа современных исследований установлено, что одним из ключевых регуляторов митохондриального биогенеза является коактиватор PGC-1 α . Он участвует в активации генетических программ, связанных с формированием митохондрий, окислительным метаболизмом и адаптацией мышечных клеток к физической нагрузке [6].

Особый интерес для подготовки ватерполистов представляют данные J. P. Little и соавторов, которые показали, что высокоинтенсивная интервальная тренировка способна активировать механизмы митохондриального биогенеза через увеличение ядерного содержания PGC-1 α в скелетных мышцах [7]. Это

имеет прямое значение для водного поло, так как структура соревновательной деятельности в данном виде спорта близка к интервальной модели нагрузки: короткие интенсивные действия чередуются с фазами неполного восстановления.

Также было установлено, что интенсивность тренировочной нагрузки влияет на выраженность митохондриальных адаптаций. С. Granata, J. P. Little, D. J. Bishop и соавторы показали, что интенсивность тренировки может модулировать изменения PGC-1 α , p53 и митохондриального дыхания в скелетных мышцах человека [8]. Это подтверждает, что для развития специальной выносливости ватерполистов важны не только объёмные аэробные нагрузки, но и высокоинтенсивные интервальные упражнения, повторные спринты и игровые задания, моделирующие реальные соревновательные условия.

4. Митохондриальные адаптации связаны с повторной спринтерской способностью ватерполистов

Анализ данных по водному поло показывает, что повторная спринтерская способность является одним из важных показателей специальной подготовленности ватерполистов. В исследовании Y. Meckel, D. Bishop и соавторов было показано, что repeated sprint ability у элитных ватерполистов связана как с аэробными, так и с анаэробными показателями работоспособности [2].

С позиции митохондриальной адаптации это имеет важное объяснение. Повторное выполнение коротких интенсивных действий требует не только анаэробной мощности, но и способности быстро восстанавливать энергетические ресурсы между спринтами. Митохондрии участвуют в аэробном ресинтезе АТФ, восстановлении фосфокреатина и окислении метаболитов, образующихся при интенсивной мышечной работе.

Это означает, что митохондриальный биогенез может косвенно повышать способность ватерполиста многократно выполнять рывки, ускорения, борьбу за позицию и защитные действия без резкого снижения мощности. Чем выше митохондриальная функция, тем быстрее спортсмен восстанавливается между игровыми эпизодами и тем дольше сохраняет соревновательную активность.

5. Лактатный обмен следует рассматривать не только как показатель утомления, но и как фактор энергетической адаптации

Одним из важных результатов анализа является переосмысление роли лактата в развитии специальной выносливости. В традиционных представлениях лактат часто рассматривался как продукт утомления. Однако современная концепция G. A. Brooks о lactate shuttle показывает, что лактат является не только маркером интенсивной работы, но и важным энергетическим субстратом, который может использоваться организмом в процессе физической нагрузки и восстановления [9].

Для водного поло это имеет принципиальное значение. Ватерполист во время игры многократно выполняет действия высокой интенсивности, которые сопровождаются усилением анаэробного гликолиза и повышением концентрации лактата. Однако высокий уровень специальной выносливости связан не просто со способностью «терпеть» лактат, а со способностью эффективно его транспортировать, окислять и использовать как источник энергии.

Митохондрии играют важную роль в окислении лактата. Поэтому повышение митохондриальной мощности может способствовать более эффективной утилизации лактата, снижению метаболического напряжения и поддержанию работоспособности в условиях повторных интенсивных нагрузок.

Следовательно, развитие митохондриального аппарата мышц может улучшать не только аэробную работоспособность, но и способность ватерполиста переносить высокую плотность игровых действий.

6. Митохондриальный биогенез связан с устойчивостью технико-тактических действий в условиях утомления

Анализ показал, что значение митохондриального биогенеза выходит за пределы чисто физиологической работоспособности. В водном поло утомление влияет не только на скорость плавания или силу движений, но и на качество технических действий. При нарастающем утомлении у спортсмена может снижаться точность передач, ухудшаться координация броска, замедляться реакция, нарушаться выбор позиции и возрастать количество тактических ошибок.

Если митохондриальная система развита недостаточно, спортсмен быстрее теряет способность поддерживать высокий уровень мышечной работы. Это приводит к нарушению двигательной координации и снижению эффективности игровых действий. Напротив, высокий уровень митохондриальной адаптации способствует более устойчивому энергетическому обеспечению мышц, ускоренному восстановлению и сохранению качества движений даже в условиях высокой интенсивности.

На основании этого можно сделать вывод, что митохондриальный биогенез является не только физиологическим механизмом выносливости, но и косвенным фактором сохранения технико-тактической эффективности ватерполистов.

7. Тренировочные средства должны быть направлены на стимуляцию митохондриальной адаптации

Полученные данные позволяют определить, какие тренировочные средства наиболее перспективны для развития специальной выносливости ватерполистов с позиции митохондриального биогенеза. Наиболее значимыми являются:

- высокоинтенсивные интервальные упражнения в воде;
- повторные спринты с неполным восстановлением;
- игровые упражнения высокой плотности;
- технические действия после интенсивной нагрузки;
- упражнения в вертикальном положении с активной работой ног;
- малые игровые формы 2×2, 3×3, 4×4;
- серии бросков, передач и защитных действий на фоне утомления.

Такие упражнения создают контролируемый энергетический стресс, который может активировать внутриклеточные сигнальные пути, связанные с митохондриальной адаптацией. При этом важно, чтобы нагрузка была не хаотичной, а педагогически дозированной: с учётом возраста, квалификации, амплуа, уровня подготовленности и скорости восстановления спортсменов.

8. Обобщённая модель полученных данных

На основе анализа литературы можно представить следующую теоретическую модель:

Специфическая нагрузка в водном поло
→ повторные ускорения, борьба, вертикальная работа, броски, защита, неполное восстановление
→ энергетический стресс мышечной клетки
→ активация PGC-1 α , AMPK, p38 MAPK и других регуляторных механизмов
→ митохондриальный биогенез и повышение окислительной способности мышц
→ ускорение ресинтеза АТФ и фосфокреатина, улучшение утилизации лактата
→ повышение устойчивости к утомлению
→ сохранение скорости, силы, техники и тактической эффективности
→ развитие специальной выносливости ватерполистов.

Данная модель показывает, что специальная выносливость ватерполиста формируется не только через внешнюю тренировочную нагрузку, но и через внутренние клеточные адаптации. Поэтому тренировочный процесс должен быть направлен не просто на увеличение объема работы, а на создание таких условий, при которых организм спортсмена адаптируется к повторным высокоинтенсивным игровым действиям.

9. Основные полученные данные

В результате теоретического анализа были получены следующие данные:

1. Специальная выносливость ватерполистов имеет комплексный характер и включает педагогический, физиологический и клеточно-молекулярный уровни.
2. Митохондриальный биогенез является одним из ключевых механизмов повышения окислительной способности скелетных мышц.
3. PGC-1 α выступает важным регулятором митохондриальной адаптации к физическим нагрузкам.
4. Высокоинтенсивные интервальные нагрузки могут быть эффективным стимулом для активации механизмов митохондриального биогенеза.
5. Повторная спринтерская способность ватерполистов связана не только с анаэробной мощностью, но и с аэробным восстановлением между интенсивными действиями.
6. Лактатный обмен следует рассматривать как важный компонент энергетической адаптации, а не только как показатель утомления.

7. Митохондриальные адаптации способствуют ускорению восстановления, повышению устойчивости к утомлению и сохранению технико-тактической эффективности.

8. Для развития специальной выносливости ватерполистов целесообразно использовать тренировочные средства, которые сочетают высокую интенсивность, игровую специфичность и техническую направленность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый теоретико-аналитический обзор позволяет заключить, что митохондриальный биогенез занимает важное место в механизмах развития специальной выносливости ватерполистов. Водное поло предъявляет к спортсмену комплексные требования: способность многократно выполнять ускорения, рывки, борьбу за позицию, бросковые и защитные действия, быстро восстанавливаться между эпизодами нагрузки и сохранять техническую точность в условиях утомления. Эти требования невозможно объяснить только с позиции общей физической подготовленности или внешних показателей тренировочной нагрузки.

Митохондрии скелетных мышц являются центральным звеном энергетического обеспечения, так как участвуют в аэробном образовании АТФ, восстановлении фосфокреатина, утилизации лактата и поддержании окислительного метаболизма. Под влиянием систематических тренировочных воздействий происходит митохондриальная адаптация, включающая увеличение количества митохондрий, повышение их функциональной активности и улучшение способности мышц переносить повторяющийся энергетический стресс. Именно эти процессы создают клеточную основу для повышения устойчивости ватерполистов к соревновательному утомлению.

Особое значение имеет то, что специальная выносливость в водном поло проявляется не изолированно, а через качество игровых действий. Если спортсмен быстро утомляется, снижается не только его скорость, но и точность передач, эффективность бросков, качество защитных перемещений, способность принимать решения и выполнять тактические задачи. Следовательно, митохондриальный биогенез можно рассматривать как один из факторов,

косвенно обеспечивающих стабильность технико-тактической деятельности ватерполистов.

Наиболее перспективным направлением подготовки является использование таких тренировочных средств, которые одновременно развивают энергетическую устойчивость и сохраняют связь с игровой спецификой водного поло. К ним относятся высокоинтенсивные интервальные нагрузки, повторные спринты, упражнения с неполным восстановлением, малые игровые формы, технические действия после физической нагрузки, а также задания, моделирующие соревновательные ситуации. Именно такие средства создают условия для активации внутриклеточных механизмов адаптации и могут способствовать развитию специальной выносливости на более глубоком физиологическом уровне.

Таким образом, роль митохондриального биогенеза в развитии специальной выносливости ватерполистов заключается в обеспечении более эффективного энергетического обмена, ускорении восстановления, повышении устойчивости к утомлению и сохранении качества игровых действий. Рассмотрение данной проблемы на клеточно-молекулярном уровне расширяет научное понимание подготовки ватерполистов и создаёт основу для дальнейшей разработки экспериментально обоснованной методики развития специальной выносливости на этапе углублённой специализации.

Список литературы

1. Smith H. K. Applied physiology of water polo // *Sports Medicine*. — 1998. — Vol. 26, № 5. — P. 317–334. — DOI: 10.2165/00007256-199826050-00003.
2. Meckel Y., Bishop D., Rabinovich M., Kaufman L., Nemet D., Eliakim A. Repeated sprint ability in elite water polo players and swimmers and its relationship to aerobic and anaerobic performance // *Journal of Sports Science and Medicine*. — 2013. — Vol. 12, № 4. — P. 738–743.
3. Платонов В. Н. Система подготовки спортсменов в олимпийском спорте. Общая теория и её практические приложения : учебник тренера высшей квалификации. — М. : Олимп : Астрель, 2015. — Кн. 1. — 680 с.
4. Матвеев Л. П. Основы общей теории спорта и системы подготовки спортсменов. — Киев : Олимпийская литература, 1999. — 318 с.
5. Holloszy J. O., Booth F. W. Biochemical adaptations to endurance exercise in muscle // *Annual Review of Physiology*. — 1976. — Vol. 38. — P. 273–291. — DOI: 10.1146/annurev.ph.38.030176.001421.

6. Puigserver P., Wu Z., Park C. W., Graves R., Wright M., Spiegelman B. M. A cold-inducible coactivator of nuclear receptors linked to adaptive thermogenesis // *Cell*. — 1998. — Vol. 92, № 6. — P. 829–839. — DOI: 10.1016/S0092-8674(00)81410-5.
7. Little J. P., Safdar A., Wilkin G. P., Tarnopolsky M. A., Gibala M. J. An acute bout of high-intensity interval training increases the nuclear abundance of PGC-1 α and activates mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle // *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. — 2011. — Vol. 300, № 6. — P. R1303–R1310. — DOI: 10.1152/ajpregu.00538.2010.
8. Granata C., Oliveira R. S. F., Little J. P., Renner K., Bishop D. J. Training intensity modulates changes in PGC-1 α and p53 protein content and mitochondrial respiration, but not markers of mitochondrial content in human skeletal muscle // *The FASEB Journal*. — 2016. — Vol. 30, № 2. — P. 959–970. — DOI: 10.1096/fj.15-276907.
9. Brooks G. A. The lactate shuttle during exercise and recovery // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. — 1986. — Vol. 18, № 3. — P. 360–368. — DOI: 10.1249/00005768-198606000-00019.
10. Bishop D., Girard O., Mendez-Villanueva A. Repeated-sprint ability — Part II: recommendations for training // *Sports Medicine*. — 2011. — Vol. 41, № 9. — P. 741–756. — DOI: 10.2165/11590560-000000000-00000.
11. Bishop P. A., Jones E., Woods A. K. Recovery from training: a brief review // *Journal of Strength and Conditioning Research*. — 2008. — Vol. 22, № 3. — P. 1015–1024. — DOI: 10.1519/JSC.0b013e31816eb518.
12. Brooks G. A. The science and translation of lactate shuttle theory // *Cell Metabolism*. — 2018. — Vol. 27, № 4. — P. 757–785. — DOI: 10.1016/j.cmet.2018.03.008.