

УТОМЛЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ
НАГРУЗКЕ И МЕХАНИЗМЫ АДАПТАЦИИ

Н.А.ФУДИН*, В.М.ЕСЬКОВ**, О.Е. ФИЛАТОВА**, В.Г. ЗИЛОВ***, О.Н. БОРИСОВА****,
В.В. КОЗЛОВА**

* ФГБУ «Научно исследовательский институт нормальной физиологии РАМН им. П.К. Анохина», ул.
Моховая, д. 11, строение 4, Москва, Россия, 125009

** ФГБОУ ВПО «Сургутский государственный университет», пр. Ленина, д. 1, г. Сургут, Россия, 628412

*** Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, ул. Трубецкая, д.
8, стр. 2, Москва, Россия, 119991

**** ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», медицинский институт, ул. Болдина, д. 128,
Тула, Россия, 300028

Аннотация. В обзоре рассмотрены спинальные и центральные механизмы утомления, связанные с реализацией программ адаптации. Показаны морфофункциональные корреляции деятельности мотонейронов спинного мозга, участие функциональных систем организма человека, нейротрансмиттерных систем, серотонинергической, допаминергической и норадренергической систем – в механизмах утомления. Определены – фазность процессов адаптации к физическим нагрузкам, кумулятивный тренировочный эффект. Освещено участие вегетативной нервной системы, глюкокортикоидов и других гормонов и медиаторов в долговременной адаптации к физическим нагрузкам, в переходах от углеводного к жировому типу энергетического обмена. Охарактеризованы стадии дезадаптации и реадaptации к физической нагрузке, как проявление стресса, цена адаптации, кибернетические принципы обеспечения гомеостаза. Показана двухконтурная система гомеостаза: вегетативного (управляющего) и миокардиально-гемодинамического (управляемого). Определена иерархичность управления.

Ключевые слова: утомление, мотонейроны, адаптация, гомеостаз, физические нагрузки

THE HUMAN FATIGUE UNDER STATIC AND DYNAMIC PHYSICAL ACTIVITY
AND ADAPTATION MECHANISMS

N.A. FUDIN*, V.M. ESKOV**, O.E. FILATOVA**, V.G. ZILOV***, O.N. BORISOVA****, V.V. KOZLOVA**

* FGBU "Scientific Research Institute of Normal Physiology RAMS. PK Anokhin,
"st. Moss, d. 11, Building 4, Moscow, Russia, 125009

** VPO "Surgut State University," Lenin ave., D. 1, Surgut, Russia, 628412

*** First Moscow State Medical University. IM Sechenov Street. Trubetskaya, d. 8, p. 2, Moscow, Russia, 119991

**** VPO "Tula State University", Medical University, ul. Boldin, d. 128, Tula, Russia, 300028

Abstract. This review focuses on spinal and central mechanisms of fatigue associated with the implementation of adaptation programs. The morpho-functional correlations of the moto-neurons activity of the spinal cord, the activities of the functional systems of the human body, neurotransmitter systems, serotonergic, dopaminergic and noradrenergic systems in the mechanisms of fatigue were considered. The phases of the process of adaptation to physical loads as well as cumulative training effect were identified. The authors have identified and described the participation of the autonomic nervous system, glucocorticoids and other hormones and mediators in long-term adaptation to physical loads, in the transition from carbohydrate to fat type of energy metabolism. The stages of disadaptation and re-adaptation to physical activities (a manifestation of stress, rate adaptation, cybernetic principles of homeostasis) have been identified and described. The two-circuit system homeostasis: the autonomic (controlling) and myocardial-hemodynamic (controlled) was demonstrated and an hierarchy of control has been defined.

Key words: fatigue, moto-neurons, adaptation, homeostasis, physical activity.

Спинальные механизмы «центрального» утомления человека при статической физической работе обусловлены снижением функции мотонейронов спинного мозга [1, 32, 33]. Снижение функции мотонейронов спинного мозга при физической работе происходит в результате уменьшения возбудимости α - и γ -мотонейронов передних рогов сегментов спинного мозга. Этот феномен называется *адаптацией*. При развитии адаптации мотонейроны постепенно уменьшают частоту генерации потенциалов действия в процессе выполнения физической работы, что приводит к снижению физиологических показателей работоспособ-

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

ности мышц во время статической физической работы. Различают раннюю и позднюю адаптацию мотонейронов. *Ранняя адаптация мотонейронов* возникает в первые секунды после начала мышечных сокращений, а *поздняя* – в процессе выполнения физической работы по мере развития утомления [17].

Физиологический механизм адаптации при утомлении человека имеет место в мотонейронах, иннервирующих мышцы как верхних, так и нижних конечностей [36]. Именно снижение частоты разрядов спинальных мотонейронов является основной причиной уменьшения силы и мощности мышечного сокращения.

Одновременно при развитии утомления увеличивается период времени мышечного расслабления. Адаптация мотонейронов может привести к полному прекращению активности отдельных двигательных единиц. Это характерно, прежде всего, для низкопороговых мотонейронов спинного мозга и механизм развивается при участии тормозного медиатора гамма-аминомасляной кислоты. При этом частота генерации импульсов в мотонейронах снижается тем быстрее, чем выше скорость мышечного сокращения, т. е. прямо зависит от мощности выполняемой мышцами работы. При развитии физического утомления, кроме снижения электрической активности мотонейронов спинного мозга, у нейронов начинает варьировать частота генерации импульсов. Эти изменения электрической активности мотонейронов спинного мозга, как правило, проявляется с момента снижения показателей произвольной силы мышечного сокращения [17, 36].

В основе физиологического механизма феномена адаптации мотонейронов при утомлении у человека лежат такие процессы, как возвратное торможение при участии *клеток Ренишоу*, рефлекторное уменьшение возбудимости мотонейронов под влиянием импульсов от рецепторов сокращающихся мышц, пресинаптическое торможение и, наконец, уменьшение возбудимости мотонейронов под влиянием нейромодуляторов. *Клетки Ренишоу* вызывают классическое торможение мотонейронов спинного мозга, которые иннервируют мышцы-антагонисты с одной стороны туловища, или мышцы-синергисты обеих конечностей, и, таким образом, усиливают развитие феномена адаптации мотонейронов.

Тормозные интернейроны сегментов спинного мозга, которые получают нисходящие эфферентные сигналы от двигательных центров ствола мозга и афферентные волокна от проприорецепторов скелетных мышц, также уменьшают возбудимость мотонейронов спинного мозга. В процессе мышечных сокращений к тормозным интернейронам спинного мозга поступает нарастающий поток импульсов от проприорецепторов.

В результате как *клетки Ренишоу*, так и тормозные интернейроны сегментов спинного мозга постепенно повышают свою электрическую активность и при участии тормозного медиатора гамма-аминомасляной кислоты гиперполяризуют мембрану α - и γ -мотонейронов, снижая их возбудимость. В результате у мотонейронов снижается частота генерации потенциалов действия мотонейронов, что обуславливает уменьшение силы и мощности сокращений мышц.

Во время мышечного сокращения растяжение сухожильных рецепторов (органов) Гольджи, расположенных на границе перехода соединительнотканых волокон в мышечные, вызывает генерацию потенциалов действия в чувствительных нервах. Степень возбуждения этих сухожильных рецепторов зависит от силы как изометрических, так и изотонических сокращений скелетных мышц. Нервные импульсы от органов Гольджи поступают в спинной мозг по 15 нервным волокнам и конвергируют на те же мотонейроны сегментов спинного мозга, что 1а тип афферентных волокон, через которые передаются к мотонейронам импульсы от мышечных веретен. Классическое действие 15 афферентных волокон на мотонейроны спинного мозга заключается в торможении мышц одной стороны туловища и одновременно в обширном торможении мышц-синергистов. При этом сухожильные рецепторы Гольджи в процессе развития утомления у человека оказывают влияние на снижение частоты разрядов как α -, так и γ -мотонейронов при участии механизма их пресинаптического торможения.

Свободные нервные окончания, расположенные в скелетных мышцах, возбуждаются при их растяжении, укорочении, ишемии и гипоксии мышечной ткани, что имеет место при физической работе. Нервные импульсы по афферентным немиелинизированным волокнам III и IV групп передаются в спинной мозг. Афферентные волокна III группы обильно иннервируют также сухожилия мышц. Механизм взаимодействия афферентных волокон III и IV групп, и 15 типа афферентных волокон на мотонейроны спинного мозга показан на рис. 3. Центральный механизм развития утомления при участии афферентных волокон 1а, 15 и мышечных веретен (группа II) осуществляется по типу пресинаптического торможения электрической активности мотонейронов спинного мозга [17, 33, 35].

Супраспинальные механизмы утомления человека при статической физической работе, в частности роль нейронов двигательной коры больших полушарий головного мозга, не является первичной причиной развития «центрального» утомления. Только при высокой активности нисходящих двигательных команд имеет место феномен адаптации спинальных мотонейронов как причина утомления человека [17].

Динамическая мышечная работа сопровождается активацией сердечно-сосудистой, дыхательной, эндокринной систем, двигательных центров головного и спинного мозга, а также функции многих ней-

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

ротрансмиттерных систем ЦНС [26, 27]. Физиологические проявления центрального действия этих систем при динамической физической работе человека могут быть компонентами супраспинальных механизмов «центрального» утомления. При физической динамической работе происходит активация функции серотонинергической и норадренергической систем мозга, которые могут изменять уровень активации мозга, степень мотивации выполнения физической работы, уровень внимания и устойчивость к дискомфорту и действию стрессовых факторов. Физическая работа как стрессовый фактор активирует иммунную систему, включая продукцию таких факторов, как кортизол и цитокины. Роль этих процессов в качестве «пусковых» факторов супраспинальных механизмов «центрального» утомления человека требует уточнения [27]. При этом наиболее распространенная теория супраспинальных механизмов «центрального утомления» объясняет его природу нарушением метаболизма аминокислот в нейронах серотонинергической системы мозга. Так, нарушение метаболизма аминокислот в нейронах этой медиаторной системы мозга является основной причиной изменений в цикле сна-бодрствования, гипоталамо-гипофизарной оси регуляции функций организма, а также регуляции двигательной функции. При физической работе возрастает проникновение через гематоэнцефалический барьер в мозг аминокислоты триптофана. Этому способствует активация использования в работающих мышцах аминокислот и, как следствие, увеличение концентрации в плазме крови жирных кислот. В результате в плазме крови возрастает отношение между содержанием свободного триптофана и аминокислот с короткой цепью. Триптофан в нейронах ЦНС метаболизируется в серотонин, что повышает его концентрацию в структурах базальных ганглиев, гиппокампа и ствола мозга. Так, агонисты серотонина снижают устойчивость организма к утомлению, а антагонисты, напротив, задерживают развитие этого процесса. У человека блокада обратного захвата серотонина, выделяющегося из нервных терминалей, что исключает его повторное использование в синаптической передаче, увеличивает время физической работоспособности человека (например, при езде на велосипеде или во время бега). Аналогичный эффект на сохранение физической работоспособности оказывает уменьшение соотношения свободного триптофана к аминокислотам в плазме крови путем специальной диеты.

Напротив, активация дофаминергической системы мозга при физической динамической работе тормозит синтез в нейронах мозга серотонина и снижает скорость развития «центрального утомления» при участии супраспинальных механизмов. Однако при длительной динамической физической работе происходит снижение уровня двигательной активности человека за счет периферического утомления. Это ведет к снижению активности дофаминергической системы мозга и, как следствие, увеличивается активность серотонинергической системы мозга. Серотонин, уменьшая активность супраспинальных двигательных центров головного мозга, стимулирует развитие «центрального утомления» [11, 23, 24].

Способность приспосабливаться к изменениям внешней и внутренней среды является уникальным свойством организма человека. С позиций теории управления, биологическая адаптация представляет собой динамический колебательный процесс, сопровождающийся перестройкой функциональной системы гомеостаза на новый уровень регулирования [19]. Одним из общебиологических механизмов, обеспечивающих протекание процесса адаптации, является вариабельность функционирования физиологических систем [2, 4, 5].

Понятие «адаптация» тесно связано с представлением о функциональных резервах, т. е. скрытых возможностях человеческого организма, которые могут быть реализованы в экстремальных условиях [10, 19].

Зная закономерности формирования функциональной системы, можно различными средствами эффективно влиять на отдельные ее звенья, ускоряя приспособление к физическим нагрузкам и повышая тренированность, т. е. управлять адаптационным процессом.

Знания в области изучения функционального состояния организма при занятиях физкультурой и спортом имеют первостепенное значение для специалистов в области физической культуры и спорта [27], так как позволяют решать вопросы профессиональной ориентации и отбора, допуска к оздоровительным и тренировочным занятиям, планировать режим двигательной нагрузки, исходя из уровня физической подготовленности и состояния здоровья организма человека. Эти знания важны также для занимающихся физической культурой и спортом с целью проведения самоконтроля в динамике физического совершенствования [12, 14, 15, 18, 20, 25, 28, 34].

В физиологическом отношении адаптация к мышечной деятельности является системным ответом организма, направленным на достижение высокой тренированности и минимизацию физиологической цены за это. С этих позиций адаптацию к физическим нагрузкам следует рассматривать как динамический процесс, в основе которого лежит формирование новой программы реагирования, а сам приспособительный процесс, его динамика и физиологические механизмы определяются состоянием и соотношением внешних и внутренних условий деятельности.

Нагрузки, применяемые в процессе физической подготовки, выполняют роль раздражителя, возбуждающего приспособительные изменения в организме. Тренировочный эффект определяется направленностью и величиной физиологических и биохимических изменений, происходящих под воздействием

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

применяемых нагрузок [18]. Глубина происходящих при этом в организме сдвигов зависит от основных характеристик физической нагрузки:

1. Интенсивности и продолжительности выполняемых упражнений;
2. Количества повторений;
3. Продолжительности и характера интервалов отдыха между повторением упражнений.

Определенное сочетание перечисленных параметров физических нагрузок позволяет добиться прогнозируемых изменений функционального состояния организма, улучшения обмена веществ и, в конечном итоге, повышения тренированности [34].

Процесс адаптации организма к воздействию физических нагрузок имеет фазный характер. Поэтому выделяют два этапа адаптации: срочный и долговременный (хронический) [19].

Этап срочной адаптации сводится преимущественно к изменениям энергетического обмена и связанных с ним функций вегетативного обеспечения на основе уже сформированных механизмов их реализации, он представляет собой непосредственный ответ организма на однократные воздействия физических нагрузок. При многократном повторении физических воздействий и суммировании многих следов нагрузок постепенно развивается долговременная адаптация. Этот этап связан с формированием в организме функциональных и структурных изменений, происходящих вследствие стимуляции генетического аппарата нагружаемых во время работы клеток. В процессе долговременной адаптации к физическим нагрузкам активируется синтез нуклеиновых кислот и специфических белков, в результате чего происходит увеличение возможностей опорно-двигательного аппарата, совершенствуется его энергообеспечение [19].

Установлено, что морфофункциональные перестройки при долговременной адаптации обязательно сопровождаются следующими процессами:

1. изменением взаимоотношений регуляторных механизмов;
2. мобилизацией и использованием физиологических резервов организма;
3. формированием специальной функциональной системы адаптации к конкретной деятельности.

В достижении устойчивой и совершенной адаптации большую роль играют перестройка регуляторных приспособительных механизмов и мобилизация физиологических резервов, а также последовательность их включения на разных функциональных уровнях. Вначале включаются обычные физиологические реакции и лишь затем – реакции напряжения механизмов адаптации, требующие значительных энергетических затрат с использованием резервных возможностей организма, что приводит к формированию специальной функциональной системы адаптации, обеспечивающей конкретную деятельность человека.

Фазовость протекания процессов адаптации к физическим нагрузкам позволяет выделять три разновидности эффектов в ответ на выполняемую работу. Срочный тренировочный эффект, возникающий непосредственно во время выполнения физических упражнений и в период срочного восстановления в течение 0,5-1,0 часа после окончания работы. В это время происходит устранение образовавшегося во время работы кислородного долга.

Такая реакция называется срочной адаптацией. Представление о срочной адаптации облегчит понимание постоянной адаптации, происходящей в организме, когда он сталкивается с повторяющимися циклами физических нагрузок, например, изменением функции сердечно-сосудистой системы после 6 месячных тренировочных нагрузок на развитие выносливости.

Изучены основные понятия и принципы, связанные как со срочными реакциями на физические нагрузки, так и с постоянной адаптацией к тренировкам. Ни бегун высокого уровня, ни обычный любитель бега трусцой не занимаются бегом в условиях, позволяющих осуществить детальный физиологический контроль.

Последние разработки позволяют непосредственно контролировать потребление кислорода во время произвольной физической деятельности за пределами исследовательской лаборатории. Отставленный тренировочный эффект, сущность которого составляет активизация физической нагрузкой пластических процессов для избыточного синтеза разрушенных при работе клеточных структур и восполнение энергетических ресурсов организма. Этот эффект наблюдается на поздних фазах восстановления (обычно в пределах до 48 часов после окончания нагрузки).

Кумулятивный тренировочный эффект – является результатом последовательного суммирования срочных и отставленных эффектов повторяющихся нагрузок. В результате кумуляции следовых процессов физических воздействий на протяжении длительных периодов тренировки (более одного месяца) происходит прирост показателей работоспособности и улучшение спортивных результатов.

Небольшие по объему физические нагрузки не стимулируют развитие тренируемой функции и считаются неэффективными. Для достижения выраженного кумулятивного тренировочного эффекта необходимо выполнить объем работы, превышающий величину неэффективных нагрузок.

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

Дальнейшее наращивание объемов выполняемой работы сопровождается, до определенного предела, пропорциональным увеличением тренируемой функции. Если же нагрузка превышает предельно допустимый уровень, то развивается состояние перетренированности, происходит срыв адаптации [6, 7, 19].

Адаптивные перестройки – динамический процесс, поэтому в динамике адаптационных изменений у спортсменов целесообразно выделять несколько стадий (физиологического напряжения организма, адаптированности, дизадаптации и реадаптации), каждой из которых присущи свои функционально-структурные изменения и регуляторно-энергетические механизмы. Естественно, основными, имеющими принципиальное значение в спорте следует считать две первые стадии. Применительно к общей схеме адаптации эти стадии проходит человек в процессе приспособления к любым условиям деятельности [19, 21, 30, 31].

У спортсменов в стадии напряжения организма преобладают процессы возбуждения в коре головного мозга, возрастают функции коры надпочечников, увеличиваются показатели вегетативных систем и уровень обмена веществ; спортивная работоспособность неустойчива. В эндокринном фоне преобладают продукция катехоламинов и глюкокортикоидов, которым принадлежит ведущая роль в адаптивных сдвигах углеводного обмена. Одновременно эти гормоны повышают активность гормоночувствительной липазы жировой ткани [15, 16].

Возросший жиромобилизирующий эффект подготавливает следующую метаболическую фазу приспособительных изменений – фазу усиления липидного обмена, что соответствует преимущественно стадии адаптированности организма. Физиологическую основу этой стадии составляет вновь установившийся уровень функционирования различных органов и систем для поддержания гомеостаза в конкретных условиях деятельности. Определяемые в это время функциональные показатели в состоянии покоя не выходят за рамки физиологических колебаний, а работоспособность спортсменов стабильна и даже повышается. Следовательно, в процессе долговременной адаптации спортсменов к физическим нагрузкам гормоны играют ведущую роль в механизмах переключения энергетического обмена с углеводного типа на жировой. При этом если катехоламины подготавливают такое переключение, то глюкокортикоиды его реализуют [30, 31].

При длительном воздействии на организм интенсивных и больших по объему тренировочных и соревновательных нагрузок могут происходить нарушение нейроэндокринной регуляции, уменьшение содержания катехоламинов и глюкокортикоидов и снижение уровня энергетического обмена, в результате чего возможны различные расстройства, характеризующие наступление третьего периода адаптационных изменений – стадии дизадаптации. В это время наблюдаются неблагоприятно направленные изменения функций организма, существенное снижение общей и специальной работоспособности спортсмена, его адаптивных возможностей, а также могут развиваться преморбидные состояния и профессионально обусловленные заболевания [5, 9].

После длительного перерыва в систематических тренировках или их прекращения возникает стадия реадаптации, которая характеризуется приобретением других свойств и качеств организма. Физиологический смысл этой стадии – снижение уровня тренированности и возвращение некоторых показателей функций организма к исходным значениям. Спортсменам, систематически тренировавшимся многие годы и оставляющим большой спорт, требуются специальные, научно обоснованные оздоровительные мероприятия для возвращения организма к нормальной жизнедеятельности.

О системных механизмах адаптации к физическим нагрузкам можно судить только на основе всестороннего учета совокупности реакций целостного организма, включая реакции со стороны центральной нервной системы, двигательного и гормонального аппаратов, органов движения и кровообращения, системы крови, анализаторов, обмена веществ и др. функциональных систем. Следует также подчеркнуть, что выраженность изменений функций организма в ответ на физическую нагрузку зависит, прежде всего, от индивидуальных особенностей человека и уровня его тренированности [19, 22].

Процесс адаптации связан с неодинаковой биологической значимостью различных функциональных систем организма. Адаптация основана на согласованных реакциях отдельных органов и систем, которые изменяются хотя и неодинаково, но в целом обеспечивают оптимальное функционирование целостного организма. Этим, например, обусловлено торможение деятельности органов пищеварения и выделения у спортсменов при интенсивной физической работе, в результате чего сохраняются резервные возможности организма для усиления функций дыхания и кровообращения, непосредственно обеспечивающих организм кислородом.

Адаптационно-приспособительная деятельность требует затрат энергии, в связи с чем можно говорить о «цене адаптации» [19], которая определяется степенью напряжения регуляторных механизмов и величиной израсходованных функциональных резервов.

Концепция гомеостаза в настоящее время играет важную роль при анализе жизненных процессов на разных уровнях биологической системы. Гомеостатические свойства целостного организма являются результатом одновременного действия многочисленных и сложно организованных регуляторных механизмов, среди которых одно из центральных мест занимает вегетативная регуляция, обеспечивающая

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

постоянство уровней вещества и энергии в организме, его органах и тканях. Н. Винер [8] предложил применять методы теории управления при моделировании гомеостатических систем. С точки зрения кибернетики, гомеостаз обеспечивается за счет управления внутренними параметрами системы на основе поступающей на ее вход переработки информации о состоянии внешней среды.

Именно в области космической медицины была разработана концепция о возможности использования системы кровообращения в качестве индикатора адаптационных реакций целостного организма [2, 4, 5, 9]. Если представить организм как кибернетическую систему, состоящую из управляемого (опорно-двигательный аппарат и внутренние органы) и управляющего (центральная нервная система) элементов, то согласующим звеном между ними является аппарат кровообращения. Как известно, ведущую роль в регуляции деятельности сердца и сосудов играет вегетативная нервная система. Рассмотрим двухконтурную систему, состоящую из двух гомеостазов: вегетативного как управляющего и миокардиально-гемодинамического как управляемого. Тогда процесс адаптации организма к условиям среды может быть описан, исходя из взаимодействия между управляющим и исполнительным контурами.

Двухконтурная модель регуляции сердечного ритма была предложена Баевским Р. М. в 1968 году и основывается на кибернетическом подходе. Модель представлена в виде двух контуров (центральный и автономный), которые связаны между собой прямой и обратной связями.

С позиций теории автоматического управления работа контура центральной регуляции осуществляет задачу регулирования по программе, в отличие от контура автономной регуляции, где работа происходит в режиме компенсации отклонений. Таким образом, центральный контур (управляющий) является источником корректирующих воздействий, а автономный контур (управляемый) обеспечивает динамическую перенастройку уровня функционирования синоатриального узла.

Воздействие автономного контура идентифицируется с дыхательным компонентом, а центрального – с не дыхательным компонентом синусовой аритмии (sinus arrhythmia обусловлена колебаниями автоматической активности синоатриального узла и тонусом блуждающего нерва). Дыхательные волны усиливаются во время сна, когда уменьшаются центральные влияния на автономный контур регуляции. Различные нагрузки на организм, требующие включения в процесс управления сердечным ритмом центрального контура регуляции, ведут к ослаблению дыхательного компонента синусовой аритмии и к усилению ее не дыхательного компонента.

Общая закономерность состоит в том, что более высокие уровни управления тормозят активность более низких уровней. В ответ на нагрузочные (стрессорные) воздействия могут наблюдаться разные реакции ритма сердца. При оптимальном регулировании – управление происходит с минимальным участием высших уровней управления, с минимальной централизацией управления. При неоптимальном управлении – необходима активация все более высоких уровней управления. Это проявляется усилением не дыхательного компонента синусовой аритмии, появлением медленных волн все более высоких порядков. Чем более высокие уровни управления активируются, тем длиннее период соответствующих медленных волн сердечного ритма [2, 3, 4, 5, 13].

С учетом роли каждого из них в реализации адаптационных реакций организма переход от одного функционального состояния к другому происходит в результате изменений одного из 3 свойств биосистемы:

- 1) уровня функционирования;
- 2) функционального резерва;
- 3) степени напряжения регуляторных механизмов.

Уровень функционирования, определяемый значениями основных показателей системы кровообращения, есть не что иное, как характеристика миокардиально-гемодинамического гомеостаза.

Текущая деятельность организма всегда связана с расходом резервов, но вместе с тем происходит и их восполнение. Поэтому важна не только своевременная мобилизация резервов, но и соответствующая стимуляция процессов восстановления и защиты. Вот почему при обсуждении вопроса о функциональном резерве системы кровообращения необходимо комплексно рассматривать и миокардиально-гемодинамический гомеостаз и вегетативный гомеостаз, который имеет прямое отношение к управлению функциональными резервами организма и системы кровообращения в частности. Степень напряжения регуляторных систем, в том числе тонуса симпатического отдела вегетативной нервной системы, влияет на уровень функционирования кровообращения путем мобилизации той или иной части функционального резерва регуляторных систем в ответ на стрессорное воздействие среды может вызвать нарушение гомеостаза.

Допустимо считать, что функциональный резерв имеет прямую связь с уровнем функционирования и обратную связь со степенью напряжения регуляторных систем. Из этого следует, что о функциональном резерве можно судить не измеряя его непосредственно, а анализируя соотношения между уровнем функционирования и степенью напряжения регуляторных систем. Способность адаптироваться к воздействию фактору (или адекватно отреагировать на воздействие) без нарушения миокардиально-гемодинамического гомеостаза и устойчивость механизмов адаптации может проявиться только при дос-

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

таточном адаптационном потенциале. Это зависит не только от имеющихся функциональных резервов, но и (в меньшей степени) от адекватности и экономичности реагирования, а также эффективности управления расходом и восстановлением резервов.

Любое воздействие среды на организм вызывает, прежде всего, стресс-реакцию, которая выражается в увеличении уровня функционирования определенных систем организма (например, при физической нагрузке систем кровообращения и дыхания), одновременно включаются регуляторные системы, которые мобилизуют функциональные резервы. Контролируя уровень функционирования (обратная связь) и управления им (прямая связь), регуляторные системы так регулируют расходование функционального резерва, чтобы обеспечить гомеостатический режим взаимодействия систем, участвующих в реакции на воздействующий фактор. Если автономные механизмы не обеспечивают поддержания необходимого уровня функционирования отдельных систем, мобилизация стратегических резервов осуществляется центральными регуляторными механизмами. Важно отметить способность центральных механизмов регуляции обеспечивать реакции компенсации, т.е. при недостатке функциональных резервов одной из систем активизировать расход функциональных резервов другой связанной с ней системы, что позволяет получить необходимый конечный результат различными путями. В этом плане полезным является представление об эффекторном интеграле, объясняющее мультипараметрический характер гомеостаза. Постоянство уровня функционирования одной из доминирующих систем при воздействии данного фактора сопровождается весьма существенными физиологическими сдвигами в других функционально связанных с ней системах. Это обусловлено различным функциональным резервом каждой из систем, а также процессами адаптации и компенсации, протекающими при непосредственном участии центральных механизмов регуляции [26].

С учетом прогноза функциональной готовности можно дифференцированно осуществлять коррекцию функционального состояния путем подбора комплексов восстановительных средств разнонаправленного, а зачастую и сочетанного действия, а также коррекцию тренировочных нагрузок.

При этом анализ физиологического воздействия центральных надсегментарных систем вегетативной регуляции и его органно-периферического отображения позволяет определять конкретные клинико-диагностические подходы к распознаванию вегетативного сопровождения той или иной формы адаптационного напряжения при мышечной деятельности.

Литература

1. Арчвадзе Л.Е. Влияние статической нагрузки на точность двигательных реакций: Автореф. ...дис. канд. биол. наук. Тбилиси, 1989. 24 с.
2. Использование принципов донозологической диагностики для оценки функционального состояния организма при стрессорных воздействиях (на примере водителей автобусов) / Баевский Р.М., Берсенева А.П., Берсенев А.П. [и др.] // Физиология человека. 2009. Т. 35. № 1. С. 41–51.
3. Баевский Р.М., Черникова А.Г. К проблеме физиологической нормы: Математическая модель функциональных состояний на основе анализа вариабельности сердечного ритма // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2002. № 6. С. 11–17.
4. Баевский Р.М. Проблема оценки и прогнозирования функционального состояния и ее развитие в космической медицине // Успехи физиологических наук. 2006. Т. 37. № 3. С. 13–25.
5. Баевский Р.М. Физиологическая норма и концепция здоровья // Российский физиологический журнал. 2003. Т. 89. № 4. С. 473–489.
6. Берсенев Е.Ю., Вдовина А.Б. Анализ вариабельности сердечного ритма и возможности его использования в практике подготовки спортсменов высшей квалификации. Медико-биологические технологии повышения работоспособности в условиях напряженных физических нагрузок. М., 2004. С. 30–41.
7. Донозологическая диагностика в оценке уровня здоровья школьников/ Берсенева А.П., Денисов А.П., Берсенев А.П. [и др.] // Функциональная диагностика. 2006. № 3. С. 5–15.
8. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: Наука, 1983. 344 с.
9. Григорьев А.И., Баевский Р.М. Концепция здоровья и космическая медицина. М.: Фирма «Слово», 2007. 208 с.
10. Гудков А.Б., Попова О.Н., Лукманова Н.Б. Эколого-физиологическая характеристика климатических факторов Севера // Экология человека. 2011. № 1. С. 12–17.
11. Дармограй В.Н., Карасева Ю.В., Морозов В.Н., Морозова В.И., Наумова Э.М., Хадарцев А.А. Фитоэкидстероиды и фертильные факторы как активаторы синтоксических программ адаптации // Вестник новых медицинских технологий. 2005. № 2. С. 82–84.
12. Еськов В.М., Зилов В.Г., Хадарцев А.А. Новые подходы в теоретической биологии и медицине на базе теории хаоса и синергетики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2006. Т. 5. № 3. С. 617–623.

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

13. Еськов В.М., Филатова О.Е., Хадарцев А.А., Хадарцева К.А. Фрактальная динамика поведения человеко-мерных систем // Вестник новых медицинских технологий. 2011. № 3. С. 330–331.
14. Ильинич В.И. Физическая культура студентов и жизнь. М.: Гардарики, 2005. 366 с.
15. Физиологические методы контроля в спорте / Капилевич Л.В., Давлетьярова К.В., Кошельская Е.В. [и др.]. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 172 с.
16. Михайлов В.М. Вариабельность ритма сердца: опыт практического применения метода. 2-е изд., перераб. и доп.: Иваново: Иван. гос. мед. академия, 2002. 290 с.
17. Нормальная физиология человека / Под ред. Ткаченко Б.И. 2-е изд. М.: Медицина, 2005. 928 с.
18. Перхуров А.М. Очерки донозологической функциональной диагностики в спорте. М.: РАС-МИРБИ, 2006. 152 с.
19. Селье Г. Очерки об адапционном синдроме. М.: Медгиз, 1960. 297 с.
20. Фудин Н.А., Судаков К.В., Хадарцев А.А., Классина С.Я., Чернышов С.В. Индекс Хильдебрандта как интегральный показатель физиологических затрат у спортсменов в процессе возрастающей этапно-дозированной физической нагрузки // Вестник новых медицинских технологий. 2011. № 3. С. 244–247.
21. Хадарцев А.А., Грачев Р.В., Веневцева Ю.Л., Фудин Н.А., Наумова Э.М. Оценка эффективности фитопрепарата «Болюсы Хуато» у лиц, занимающихся спортом // Современные проблемы науки и образования (электронный). 2012. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/104-6585>
22. Хадарцев А.А., Еськов В.М., Несмеянов А.А., Фудин Н.А. Физиологические основы восприятия золотого сечения в спорте с позиций синергетики // Владикавказский медико-биологический вестник. 2013. Т. 16. № 24-25. С. 104-113.
23. Хадарцев А.А., Морозов В.Н., Карасева Ю.В., Хадарцева К.А., Гордеева А.Ю. Психонейроиммунологические программы адаптации, как модели дизадаптации у женщин с нарушенным репродуктивным циклом // Фундаментальные исследования. 2012. № 5 (часть 2). С. 359–365.
24. Хадарцев А.А., Морозов В.Н., Карасева Ю.В., Хадарцева К.А., Фудин Н.А. Патофизиология стресса, как баланс стрессогенных и антистрессовых механизмов // Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии. 2012. № 7. С. 16–21.
25. Хадарцев А.А., Несмеянов А.А., Еськов В.М., Фудин Н.А., Кожемов А.А. Принципы тренировки спортсменов на основе теории хаоса и самоорганизации // Теория и практика физической культуры. 2013. № 9. С. 87-93.
26. Хадарцев А.А., Потоцкий В.В. Диверсификация результатов научных открытий в медицине и биологии. Тула, 2009. Т. 1. 256 с.
27. Хадарцев А.А., Фудин Н.А., Орлов В.А. Медико-биологические технологии в спорте. Москва: Изд-во «Известия», 2011. 460 с.
28. Хадарцев А.А., Фудин Н.А., Радчич И.Ю. Физиологические основы визуального восприятия при подготовке спортсменов с позиций синергетики // Вестник новых медицинских технологий. 2012. № 2. С. 17–20.
29. Холодов Ж.К., Кузнецов В.С. Теория и методика физического воспитания и спорта. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 480 с.
30. Coffey V.G., Hawley J.A. The molecular bases of training adaptation // Sports Med. 2007. V. 37 (9). P. 737.
31. Duchateau J., Semmler J.G., Enoka R.M. Training adaptations in the behavior of human motor units // J. Appl. Physiol. 2006. V. 101. № 6. P. 1766.
32. Enoka R.M., Duchateau J. Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function // J. Physiol. 2008. V. 586. № 1. P. 11.
33. Adjustments differ among low-threshold motor units during intermittent, isometric contractions / Farina D., Hotobar A., Gaupni M. [et. al.] // J. Neurophysiol. 2009. V. 101. № 1. P. 350.
34. Neuro-physiological adaptations associated with cross-education of strength / Farthing J.P., Borowsky R., Chilibeck P.O. [et. al.] // Brain Topogr. 2007. V. 20 (2). P. 77.
35. Excitability at the motoneuron pool and motor cortex is specifically modulated in lengthening compared to isometric contractions / Gruber M., Linnamo V., Sirojnik V. [et. al.] // J. Neurophysiol. 2009. V. 101. № 4. P. 2030.
36. Taylor J.L., Gandevia S.C. A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and maximal voluntary contractions // J. Appl. Physiol. 2008. V. 104. № 2. P. 542.

References

1. Archvadze LE. Vliyanie staticheskoy nagruzki na tochnost' dvigatel'nykh reaktsiy [dissertation]. Tbilisi; 1989. Russian.

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

2. Baevskiy RM, Berseneva AP, Bersenev AP, et al. Ispol'zovanie printsipov donozologicheskoy diagnostiki dlya otsenki funktsional'nogo sostoyaniya organizma pri stressornykh vozdeystviyakh (na primere voditeley avtobusov). *Fiziologiya cheloveka*. 2009;35(1):41-51. Russian.
3. Baevskiy RM, Chernikova AG. K probleme fiziologicheskoy normy: Matematicheskaya model' funktsional'nykh sostoyaniy na osnove analiza variabel'nosti serdechnogo ritma. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2002;6:11-7. Russian.
4. Baevskiy RM. Problema otsenki i prognozirovaniya funktsional'nogo sostoyaniya i ee razvitie v kosmicheskoy meditsine. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk*. 2006;37(3):13-25. Russian.
5. Baevskiy RM. Fiziologicheskaya norma i kontseptsiya zdorov'ya. *Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal*. 2003;89(4):473-89. Russian.
6. Bersenev EYu, Vdovina AB. Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma i vozmozhnosti ego ispol'zovaniya v praktike podgotovki sportsmenov vysshey kvalifikatsii. *Mediko-biologicheskie tekhnologii povysheniya rabotosposobnosti v usloviyakh napryazhennykh fizicheskikh nagruzok*. Moscow; 2004. Russian.
7. Berseneva AP, Denisov AP, Bersenev AP, et al. Donozologicheskaya diagnostika v otsenke urovnya zdorov'ya shkol'nikov. *Funktsional'naya diagnostika*. 2006;3:5-15. Russian.
8. Viner N. *Kibernetika ili upravlenie i svyaz' v zhivotnom i mashine*. Moscow: Nauka; 1983. Russian.
9. Grigor'ev AI, Baevskiy RM. *Kontseptsiya zdorov'ya i kosmicheskaya meditsina*. Moscow: Firma «Slovo»; 2007. Russian.
10. Gudkov AB, Popova ON, Lukmanova NB. *Ekologo-fiziologicheskaya kharakteristika klimaticheskikh faktorov Severa*. *Ekologiya cheloveka*. 2011;1:12-7. Russian.
11. Darmogray VN, Karaseva YuV, Morozov VN, Morozova VI, Naumova EM, Khadartsev AA. *Fitoekdisteroidy i fertil'nye faktory kak aktivatory sintoksicheskikh programm adaptatsii*. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*. 2005;2:82-4. Russian.
12. Es'kov VM, Zilov VG, Khadartsev AA. *Novye podkhody v teoreticheskoy biologii i meditsine na baze teorii khaosa i sinergetiki. Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*. 2006;5(3):617-23. Russian.
13. Es'kov VM, Filatova OE, Khadartsev AA, Khadartseva KA. *Fraktal'naya dinamika povedeniya cheloveko-mernykh sistem*. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*. 2011;3:330-1. Russian.
14. Il'inich V. *Fizicheskaya kul'tura studentov i zhizn'*. Moscow: Gardariki; 2005. Russian.
15. Kapilevich LV, Davlet'yarova KV, Koshel'skaya EV, et al. *Fiziologicheskie metody kontrolya v sporte*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta; 2009. Russian.
16. Mikhaylov VM. *Variabel'nost' ritma serdtsa: opyt prakticheskogo primeneniya metoda*. 2-e izd., pererab. i dop.: Ivanovo: Ivan. gos. med. akademiya; 2002. Russian.
17. *Normal'naya fiziologiya cheloveka / Pod red. Tkachenko B.I.* 2-e izd. Moscow: Meditsina; 2005. Russian.
18. Perkhurov AM. *Ocherki donozologicheskoy funktsional'noy diagnostiki v sporte*. Moscow: RAS-MIRBI; 2006. Russian.
19. Sel'e G. *Ocherki ob adaptatsionnom sindrome*. Moscow: Medgiz; 1960. Russian.
20. Fudin NA, Sudakov KV, Khadartsev AA, Klassina SYa, Chernyshov SV. *Indeks Khil'debrandta kak integral'nyy pokazatel' fiziologicheskikh zatrat u sportsmenov v protsesse vozrastayushchey etapno-dozirovannoy fizicheskoy nagruzki*. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*. 2011;3:244-7. Russian.
21. Khadartsev AA, Grachev RV, Venevtseva YuL, Fudin NA, Naumova EM. *Otsenka effektivnosti fitopreparata «Bolyusy Khuato» u lits, zanimayushchikhsya sportom. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya (elektronnyy)*. 2012;4:URL: <http://www.science-education.ru/104-6585> Russian.
22. Khadartsev AA, Es'kov VM, Nesmeyanov AA, Fudin NA. *Fiziologicheskie osnovy vospriyatiya zolotogo secheniya v sporte s pozitsiy sinergetiki. Vladikavkazskiy mediko-biologicheskii vestnik*. 2013;16(24-25):104-13. Russian.
23. Khadartsev AA, Morozov VN, Karaseva YuV, Khadartseva KA, Gordeeva AYu. *Psikhoneyroimmunologicheskie programmy adaptatsii, kak modeli dizadaptatsii u zhenshchin s narushennym reproduktivnym tsiklom*. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2012;5(2):359-65. Russian.
24. Khadartsev AA, Morozov VN, Karaseva YuV, Khadartseva KA, Fudin NA. *Patofiziologiya stressa, kak balans stressogennykh i antistressovykh mekhanizmov. Vestnik nevrologii, psikiatrii i neyrokhirurgii*. 2012;7:16-21. Russian.
25. Khadartsev AA, Nesmeyanov AA, Es'kov VM, Fudin NA, Kozhemov AA. *Printsipy trenirovki sportsmenov na osnove teorii khaosa i samoorganizatsii. Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury*. 2013;9:87-93. Russian.
26. Khadartsev AA, Pototskiy VV. *Diversifikatsiya rezul'tatov nauchnykh otkrytiy v meditsine i biologii*. Tula; 2009. Russian.

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зиллов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).

27. Khadartsev AA, Fudin NA, Orlov VA. Mediko-biologicheskie tekhnologii v sporte. Moscow: Izd-vo «Izvestiya»; 2011. Russian.
28. Khadartsev AA, Fudin NA, Radchich IYu. Fiziologicheskie osnovy vizual'nogo vospriyatiya pri podgotovke sportsmenov s pozitsiy sinergetiki. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2012;2:17-20. Russian.
29. Kholodov ZhK, Kuznetsov VS. Teoriya i metodika fizicheskogo vospitaniya i sporta. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya»; 2004. Russian.
30. Coffey VG, Hawley JA. The molecular bases of training adaptation. Sports Med. 2007;37(9):737.
31. Duchateau J, Semmler JG, Enoka RM. Training adaptations in the behavior of human motor units. J. Appl. Physiol. 2006;101(6):1766.
32. Enoka RM, Duchateau J. Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. J. Physiol. 2008;586(1):11.
33. Farina D, Hotobar A, Gaupni M, et. al. Adjustments differ among low-threshold motor units during intermittent, isometric contractions. J. Neurophysiol. 2009;101(1):350.
34. Farthing JP, Borowsky R, Chilibeck PO, et. al. Neuro-physiological adaptations associated with cross-education of strength. Brain Topogr. 2007;20(2):77.
35. Gruber M, Linnamo V, Sirojnik V, et. al. Excitability at the motoneuron pool and motor cortex is specifically modulated in lengthening compared to isometric contractions. J. Neurophysiol. 2009;101(4):2030.
36. Taylor JL, Gandevia SC. A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and maximal voluntary contractions. J. Appl. Physiol. 2008;104(2):542.

Библиографическая ссылка:

Фудин Н.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Зилов В.Г., Борисова О.Н., Козлова В.В. Утомление человека при статической и динамической физической нагрузке и механизмы адаптации // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 2-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5064.pdf> (дата обращения: 19.01.2015).