

УДК 616.1:618.14

DOI: 10.24884/1682-6655-2021-20-1-84-90

П. В. МИХАЙЛОВ, А. В. МУРАВЬЕВ, И. А. ОСЕТРОВ,
Р. С. ОСТРОУМОВ, И. А. ТИХОМИРОВА

Структура взаимосвязей показателей аэробной работоспособности, центральной гемодинамики, микроциркуляции и реологии крови

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Ярославский государственный педагогический университет имени К. Д. Ушинского», г. Ярославль, Россия

150000, г. Ярославль, ул. Республиканская, д. 108/1

E-mail: mpv.yar@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14.12.20; принята к печати 29.01.21

Резюме

Введение. Поиск взаимосвязей между параметрами, характеризующими функциональное состояние организма на разных его уровнях, является важной задачей при проведении исследований в области физиологии. Поскольку эти взаимосвязи могут быть сложными, опосредованными дополнительными факторами и при использовании парной корреляции не выявляться, то в этом случае представляется оправданным для поиска скрытой структуры связей множества переменных применение факторного анализа. **Цель** – проведение факторного анализа комплекса данных, включающего показатели аэробной работоспособности, центральной гемодинамики, микроциркуляции (МЦ) и реологии крови. **Материалы и методы.** В исследовании приняли участие 172 мужчины в возрасте от 20 до 60 лет. Уровень физической работоспособности оценивали по результатам теста PWC₁₇₀. Параметры МЦ определяли с помощью метода биомикроскопии и лазерной доплеровской визуализации (LDI). Среди гемореологических характеристик измеряли вязкость крови и плазмы, агрегацию и деформируемость эритроцитов. Статистическую обработку полученных данных, включающую факторный анализ, проводили с использованием программного пакета «Statistica 6.0». При построении факторной модели, включающей 32 параметра, учитывались переменные с факторной нагрузкой более 0,60. **Результаты.** Было выделено три фактора, которые составили 71 % от общей дисперсии. Первый фактор был тесно взаимосвязан с параметрами, характеризующими уровень аэробной производительности организма и его адаптационный потенциал. Второй фактор коррелировал с параметрами системы кровообращения, характеризующими условия гемодинамики на центральном уровне и микроциркуляторном, включая интегральные реологические показатели. Третий фактор был взаимосвязан с параметрами, характеризующими кровоток на уровне микрососудов, а также реологические свойства эритроцитов. **Заключение.** Построенная факторная модель демонстрирует иерархическую структуру взаимосвязей показателей аэробной работоспособности, центральной гемодинамики, МЦ, реологии крови. Выделенные факторы – скрытые элементы этой структуры, связывающие отдельные переменные, – были интерпретированы как уровни интеграции: организменный, системный и микроуровневый.

Ключевые слова: факторный анализ, аэробная работоспособность, микроциркуляция, реологические свойства крови, деформируемость эритроцитов

Для цитирования: Михайлов П. В., Муравьев А. В., Осетров И. А., Остроумов Р. С., Тихомирова И. А. Структура взаимосвязей показателей аэробной работоспособности, центральной гемодинамики, микроциркуляции и реологии крови. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2021;20(1):84–90. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-1-84-90.

UDC 616.1:618.14

DOI: 10.24884/1682-6655-2021-20-1-84-90

P. V. MIKHAYLOV, A. V. MURAVYOV, I. A. OSETROV,
R. S. OSTROUMOV, I. A. TIKHOMIROVA

The structure of the relationship between indicators of aerobic performance, central hemodynamics, microcirculation and hemorheology

Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia

108/1, Respublikanskaya str., Yaroslavl, Russia, 150000

E-mail: mpv.yar@yandex.ru

Received 14.12.20; accepted 29.01.21

Summary

Introduction. In physiological research, an important task is to find the relationship between the various functional parameters of the organism, its individual systems and its elements. These relationships can be complex, mediated by additional factors and when using pair correlation, they cannot be detected. In this case, it seems justified to use factor analysis to search

for the hidden structure of relationships between many variables. *The aim.* Factor analysis of a set of data, including indicators of aerobic performance, central hemodynamics, microcirculation (MC) and hemorheology. *Materials and methods.* The study involved 172 men aged 20 to 60 years. Physical performance was determined using the PWC₁₇₀ test. Microcirculation parameters were determined using biomicroscopy and Laser Doppler Imaging (LDI). The complex of hemorheological characteristics included the viscosity of blood and plasma, aggregation and deformability of erythrocytes. Statistical processing, including factor analysis, was carried out using the Statistica 6.0 software package. The factorial model included 32 parameters. When interpreting the results of factor analysis, variables with factor loadings of more than 0.60 were considered. *Results.* Three factors were identified, which accounted for 71 % of the total variance. The first factor closely correlated with the level of the body's aerobic performance parameters and its adaptive potential. The second factor correlated with hemodynamic parameters at the central and microcirculatory level, including integral rheological parameters. The third factor correlated with the parameters of microvessels and the rheological properties of erythrocytes. *Conclusions.* The constructed factor model demonstrates the level structure of the relationships of indicators of aerobic performance, central hemodynamics, microcirculation, and hemorheology. The selected factors – the hidden elements of this structure linking individual variables – were interpreted as levels of integration: organismic, systemic and microlevel.

Keywords: factor analysis, aerobic performance, microcirculation, rheological properties of blood, deformability of erythrocytes

For citation: Mikhaylov P. V., Muravyov A. V., Osetrov I. A., Ostroumov R. S., Tikhomirova I. A. The structure of the relationship between indicators of aerobic performance, central hemodynamics, microcirculation and hemorheology. *Regional blood circulation and microcirculation*. 2021;20(1):84–90. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-1-84-90.

Введение

Для доставки в тканевый микрорайон дыхательных газов, субстратов окисления и регуляторных молекул необходима скоординированная работа системной гемодинамики, регионарного кровотока, микроциркуляции и реологии крови [1]. Поэтому одной из важных задач при проведении исследований в области физиологии является поиск взаимосвязей между показателями, характеризующими функциональное состояние организма как единого целого, отдельных его систем и входящих в них элементов. Установление связей необходимо для более глубокого понимания структурной организации многокомпонентной системы, а также является важным этапом в поиске биомаркеров различных физиологических и патологических состояний [2–6]. Как правило, для этого используют парную корреляцию, которая позволяет определить тесноту взаимосвязи двух переменных. Но поскольку в организме человека связи отдельных взятых показателей могут быть сложными и опосредованы дополнительными факторами, то возможности данного статистического метода не всегда позволяют их в полной мере выявить и получаемые коэффициенты корреляции могут быть ниже гипотетических. Подобные ситуации могут иметь место при корреляционном анализе параметров, относящихся к разным уровням интеграции организма, например, системному и клеточному, так как связи между этими уровнями могут зависеть от факторов, которые при определении парной корреляции в расчет не принимаются. В этом случае представляется оправданным для поиска скрытой структуры взаимосвязей множества переменных применение факторного анализа – статистического метода, который позволяет объединить информацию по большому числу показателей [7, 8]. Выделенные факторы являются скрытыми элементами этой структуры, связывающими (нагружающими) отдельные переменные. Основываясь на факторных нагрузках параметров, появляется возможность количественной оценки факторов и дальнейшей интерпретации построенной факторной модели [8–10].

Цель работы – проведение факторного анализа комплекса данных, включающего показатели аэроб-

ной работоспособности, центральной гемодинамики, микроциркуляции и реологии крови.

Материалы и методы исследования

В исследовании приняли участие 172 мужчины в возрасте от 20 до 60 лет, имеющие разный уровень физической работоспособности, который оценивали по результатам теста PWC₁₇₀. У испытуемых определяли параметры центральной гемодинамики в состоянии покоя: систолическое артериальное давление (САД) и диастолическое (ДАД); частоту сердечных сокращений (ЧСС); рассчитывали среднее артериальное давление (АД_{ср.}) и двойное произведение (ДП). На основании результатов теста PWC₁₇₀ рассчитывали величину максимального потребления кислорода (МПК), пульсовый критерий экономичности (ПКЭ) и критическую мощность (W_{кр.}), под которой понимали отношение достигнутой мощности работы на велоэргометре (Вт) к массе тела испытуемого (кг). Состояние микроциркуляции (МЦ) оценивали с помощью биомикроскопии бульбарной конъюнктивы: измеряли диаметры параллельно идущих артериол (DA) и венул (DB) и ногтевого ложа, а также измеряли диаметр переходной части капилляров (DK) и подсчитывали плотность функционирующих капилляров (ПФК). При помощи лазерной доплеровской визуализации (LDI) измеряли перфузию кожи на середине предплечья (ПМ – показатель МЦ). Все параметры МЦ определяли в покое и сразу после теста PWC₁₇₀. Зарегистрированные изменения выражали в процентах к исходным значениям.

Цельную кровь получали венопункцией в вакуумные пробирки (6 мл, 13×100 мм, «VACUETTE» с K2 ЭДТА для гематологии, без резьбы) в условиях клинической лаборатории квалифицированным медицинским персоналом после получения информированного согласия донора. Все измерения и манипуляции с цельной кровью проводили в течение 4 ч после ее забора, при комнатной температуре 20,0±0,5 °С, которую контролировали с помощью кондиционера. Среди гемореологических характеристик определяли гематокрит (Hct), концентрацию гемоглобина в крови (Hb), вязкость цельной крови (ВК) при относительно высоких (2,0 мПа) и низких (0,2 мПа) напряжениях

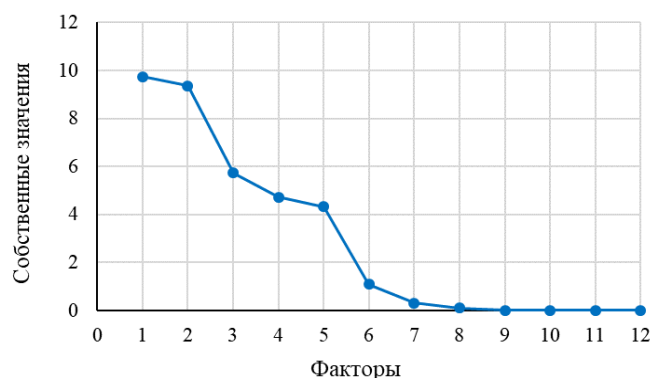


Рис. 1. График собственных значений

Fig. 1. Graph of eigenvalues

сдвига, вязкость плазмы (ВП), вязкость суспензии эритроцитов со стандартизированным гематокритом 40 % (ВС), рассчитывали показатель эффективности транспорта кислорода (Нст/ВК). Для оценки микро-реологических свойств эритроцитов определяли показатель агрегации (ПА), среднее число клеток в эритроците (Ч/А) и индекс удлинения эритроцитов (ИУЭ), характеризующий их деформируемость. Все испытуемые дали информированное согласие на участие в исследовании, и исследование было одобрено Этическим комитетом университета (протокол № 6 от 18.06.2020 г.).

Статистическую обработку полученных данных, включающую в себя факторный анализ, проводили с использованием программного пакета «Statistica 6.0». Структуру взаимосвязей указанных выше показателей определяли с помощью метода главных компонент. Он заключается в выделении ограниченного числа компонент (главных факторов), вносящих наибольший вклад в общую дисперсию данных, при этом остальные факторы исключаются из анализа для упрощения интерпретации результатов. Соотношение числа наблюдений к числу признаков составило 5:1, что соответствует требованиям к применению данного статистического метода. Для стандартизации множества показателей, имеющих разную размерность, все исходные данные подвергали нормированию. При построении факторной модели, включающей в себя 32 параметра, учитывали переменные с факторной нагрузкой более 0,60. Число факторов, подлежащих интерпретации, определяли с использованием критерия «каменистой осыпи» Кеттелла, суть которого состоит в поиске точки на графике (рис. 1), где убывание собственных значений слева направо максимально замедляется [7]. Применение методов вращения компонентов, которые часто используются для усиления факторных нагрузок, не приводило к упрощению факторной модели и не делало ее более понятной для дальнейшей интерпретации, поэтому в нашей работе описана модель без вращения компонентов.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показан график убывания собственных значений от фактора к фактору. Характерный излом кривой, свидетельствующий о замедлении убывания, был после третьего критерия, соответственно, это

число факторов и было выделено для описания и дальнейшей интерпретации. Суммарная доля трех выделенных факторов в общей дисперсии составила 71 %.

Первый фактор (28 % от общей дисперсии) имеет высокую положительную корреляцию с показателем физической работоспособности, выраженным через индекс PWC_{170} ($r=0,86$), критической мощностью ($r=0,89$) и уровнем МПК/кг ($r=0,84$). Этот фактор оказался отрицательно связан с пульсовыми характеристиками, зарегистрированными в покое ($r=-0,86$) и в условиях мышечной нагрузки (ПКЭ) ($r=-0,81$). Он был интерпретирован как «организменный», так как был тесно взаимосвязан с параметрами, характеризующими уровень аэробной производительности организма и его адаптационный потенциал, при этом факторная нагрузка показателей МЦ и реологии крови была низкой (табл. 1).

Второй фактор (27 % от общей дисперсии) имеет отрицательную взаимосвязь с параметрами артериального давления ($r=-0,73-0,86$), величинами вязкости крови при высоких и низких напряжениях сдвига ($r=-0,77-0,80$) и вязкости суспензии эритроцитов со стандартным гематокритом при высоких скоростях течения ($r=-0,76$). Прямая взаимосвязь второго фактора была с диаметром артериол конъюнктивы ($r=0,71$), диаметром капилляров кожи ($r=0,87$) и с показателем эффективности транспортной функции крови ($r=0,87$). Он был интерпретирован как «системный», так как тесно коррелировал с параметрами системы кровообращения, характеризующими условия гемодинамики на центральном уровне и микроциркуляторном, включая интегральные реологические показатели.

Третий фактор (16 % от общей дисперсии) имеет положительную взаимосвязь с диаметром венул ($r=0,77$), плотностью функционирующих капилляров кожи ($r=0,66$), изменением их диаметра в ответ на функциональную нагрузку ($r=0,68$), резервом перфузии ($r=0,67$) и вязкостью плазмы ($r=0,61$). Обратная взаимосвязь третьего фактора была с изменением диаметра венул конъюнктивы после мышечной нагрузки ($r=-0,70$) и деформируемостью эритроцитов ($r=-0,81$). Данный фактор был интерпретирован как «микроциркуляторный», поскольку коррелировал с показателями, характеризующими кровоток на уровне микрососудов, а также микрореологические свойства эритроцитов, при этом факторная нагрузка параметров центральной гемодинамики и физической работоспособности снижалась.

Результаты факторного анализа демонстрируют иерархическую структуру взаимосвязей комплекса рассматриваемых параметров, относящихся к физической работоспособности, центральной гемодинамике, микроциркуляции и гемореологии (рис. 2).

В представленной факторной модели основной вклад в общую дисперсию вносит первый фактор, в котором наибольшие факторные нагрузки имели показатели, характеризующие организменный уровень интеграции – его аэробную производительность, при этом корреляционные взаимосвязи данного фактора с параметрами микроциркуляции и реологии крови

Результаты факторного анализа параметров физической работоспособности, центральной гемодинамики, МЦ и реологии крови (в скобках указана факторная нагрузка параметров, вошедших в факторную модель)**Results of factor analysis of parameters of physical working capacity, central hemodynamics, microcirculation and hemorheology (factor load of the parameters included in the factor model is indicated in brackets)**

Показатель	M±σ	Фактор 1 (28 % от общей дисперсии)	Фактор 2 (27 % от общей дисперсии)	Фактор 3 (16 % от общей дисперсии)
ЧСС, уд./мин	66,0±12,7	-0,86	0,21	0,04
САД, мм рт. ст.	127,9±12,0	0,20	-0,73	0,12
ДАД, мм рт. ст.	78,9±10,5	-0,10	-0,86	0,34
АД ср., мм рт. ст.	95,0±10,2	-0,01	-0,84	0,28
ДП, отн. ед.	84,6±19,0	-0,75	-0,06	0,07
PWC170/кг, кг·м/мин/кг	20,1±5,0	0,86	0,38	-0,11
МПК/кг, мл/мин/кг	49,8±9,4	0,84	0,36	0,02
Wкр., Вт/кг	3,3±0,8	0,89	0,32	-0,08
ПКЭ, отн. ед.	0,165±0,052	-0,81	-0,46	-0,17
DA, мкм	14,6±4,8	-0,43	0,70	0,26
DB, мкм	28,5±11,1	0,16	0,58	0,77
A/B, отн. ед.	0,54±0,11	-0,53	0,10	-0,55
DK, мкм	16,3±3,7	-0,42	0,87	0,56
ПФК, 1/мм ²	60,1±15,0	0,11	-0,33	0,66
ПМ, отн. ед.	7,6±2,3	0,10	0,44	-0,43
Hct, %	47,0±2,7	0,47	0,01	0,03
Hb, г/л	147,8±9,5	0,14	-0,52	0,39
МСНС, г/дл	31,5±2,1	-0,41	-0,28	0,18
BK1, мПа·с	2,77±0,43	0,46	-0,77	-0,2
BK2, мПа·с	4,86±1,20	0,01	-0,80	-0,2
BC, мПа·с	1,57±0,27	0,11	-0,76	-0,49
BP, мПа·с	1,94±0,20	0,5	-0,42	0,71
Hct/BK1, отн. ед.	17,3±2,3	-0,22	0,87	0,32
ПА, отн. ед.	0,037±0,025	0,37	0,14	-0,38
Ч/А	4,60±0,68	0,05	-0,27	-0,1
ИУЭ, отн. ед.	0,236±0,020	-0,44	0,08	-0,81
DA изм., %	6,4±30,7	0,31	-0,73	0,26
DB изм., %	5,0±38,1	0,35	-0,2	-0,70
A/B изм., %	4,9±21,0	0,02	-0,29	0,53
DK изм., %	5,1±10,1	0,26	0,43	0,68
ПФК изм., %	12,0±15,4	0,08	-0,48	0,18
ПМ изм., %	70,6±60,5	0,4	-0,48	0,67

Примечание: ЧСС – частота сердечных сокращений; САД – артериальное давление систолическое; ДАД – артериальное давление диастолическое; АД ср. – артериальное давление среднее; ДП – двойное произведение; PWC170/кг – относительный показатель аэробной работоспособности; МПК/кг – относительный показатель максимального потребления кислорода; Wкр. – критическая мощность; ПКЭ – пульсовый критерий экономичности; DA – диаметр артериол; DB – диаметр венул; A/B – артериоловеноулярное соотношение; DK – диаметр капилляров; ПФК – плотность функционирующих капилляров; ПМ – показатель МЦ (перфузия); Hct – гематокрит; Hb – концентрация гемоглобина в крови; МСНС – средняя концентрация гемоглобина в эритроците; BK1 – вязкость крови при относительно высоком напряжении сдвига (2,0 мПа); BK2 – вязкость крови при относительно низком напряжении сдвига (0,2 мПа); BC – вязкость суспензии эритроцитов; BP – вязкость плазмы; Hct/BK1 – показатель эффективности транспортной функции крови; ПА – показатель агрегации эритроцитов; Ч/А – число клеток в агрегате; ИУЭ – индекс удлинения эритроцитов; DAизм. – изменение диаметра артериол после дозированной физической нагрузки (ДФН); DBизм. – изменение диаметра венул после дозированной физической нагрузки; A/Визм. – изменение артериоловеноулярного соотношения после ДФН; DKизм. – изменение диаметра капилляров после ДФН; ПФКизм. – изменение числа функционирующих капилляров после ДФН; ПМизм. – изменение показателя МЦ после ДФН (прирост перфузии).



Рис. 2. Структура взаимосвязей параметров, относящихся к разным уровням интеграции организма, в соответствии с предложенной интерпретацией результатов факторного анализа

Fig. 2. The structure of the relationship of parameters related to different levels of integration of the organism, in accordance with the proposed interpretation of the results of factor analysis

были слабыми. Известно, что выполнение абсолютного большинства бытовых и производственных физических усилий связано с аэробной энергопродукцией и величина МПК тесно связана с уровнем здоровья и продолжительностью жизни человека [11–13]. Это позволяет рассматривать показатель МПК в качестве интегрального количественного критерия, характеризующего адаптационный потенциал организма.

Вклад второго фактора в общую дисперсию был лишь на 1 % меньше, чем первого, а параметры, имеющие наибольший факторный вес, относились к системному уровню организации гемодинамики. Известно, что в системе кровообращения эффективность реализации транспортной функции определяется оптимальным сочетанием ряда факторов, среди которых движущая сила – давление, диаметр сосудов и вязкость крови [14, 15]. Регуляторные изменения этих параметров лежат в основе адаптационных и компенсаторных перестроек гемодинамики. Например, для долговременной адаптации к аэробным упражнениям характерно умеренное снижение вязкости крови, что способствует повышению эффективности кровотока на всех уровнях, включая и микроциркуляцию [16]. Примером компенсаторных изменений может быть увеличение вязкости крови для сохранения тканевой перфузии на адекватном запросе тканей уровне при повышенном артериальном давлении, которое часто сопровождается сужением

сосудов притока [17]. В этом случае повышенная вязкость создает большее напряжение сдвига на эндотелии, что, в свою очередь, способствует образованию оксида азота в эндотелиоцитах, его диффузии к гладкомышечным клеткам артериол и дилатации последних [15].

Третий выделенный фактор имеет существенно меньший вклад в общую дисперсию, чем первый и второй (на 12 и 10 % соответственно), а наибольшую факторную нагрузку имели показатели, относящиеся к микроциркуляторному уровню и характеризующие микрососудистый и клеточный компоненты. При этом корреляционные взаимосвязи третьего фактора с параметрами центральной гемодинамики и физической работоспособности были существенно менее выраженными. На уровне МЦ на величину тканевой перфузии и на ее функциональный резерв существенное влияние оказывает слаженность сосудистых реакций [18]. Изменение просвета сосудов притока и оттока в системе МЦ позволяет регулировать число перфузируемых капилляров. Кроме того, микроциркуляторные параметры эритроцитов – их деформируемость и агрегация, а также активация и адгезия к эндотелию лейкоцитов – могут влиять на кровоток в микрососудах [19, 20]. Известно, что эритроциты, представляющие самую многочисленную популяцию клеток крови, в процессе прохождения через пути МЦ значительно деформируются. От того, насколько легко они могут изменять свою форму под действием внешних сил, зависит эффективность реализации кислородтранспортной функции крови [21]. В комплекс важных гемореологических параметров входит вязкость плазмы, поскольку движущее давление передается на клетки крови через плазму, а, следовательно, ее вязкость может влиять на эффективность этой передачи и перфузию тканей [22]. В представленной факторной модели все эти параметры, относящиеся к микроуровню интеграции, имели выраженные взаимосвязи с третьим фактором (рис. 3).

Представленная факторная модель согласуется и в определенной мере может объяснять результаты парной корреляции, при использовании которой не всегда удается выявить выраженные взаимосвязи между переменными, характеризующими разные

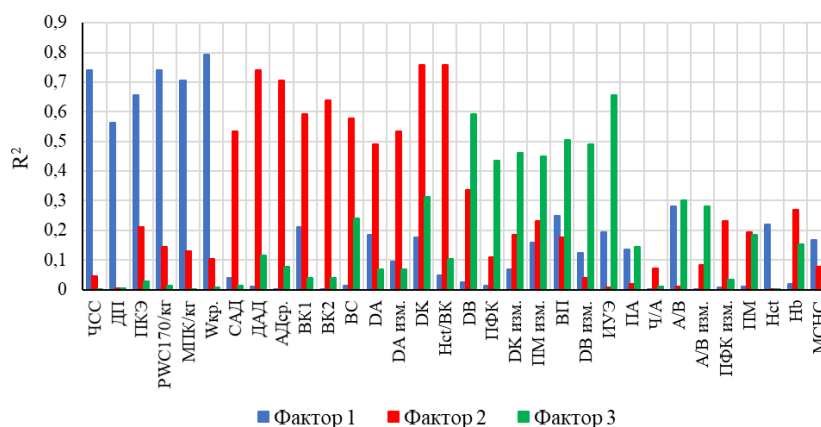


Рис. 3. Графическое изображение обобщенной факторной модели: R^2 – факторные нагрузки, возведенные в квадрат; сокращения показателей те же, что в таблице

Fig. 3. Graphical representation of generalized factor model: R^2 – factor loads squared; abbreviated designations of indicators are the same as in table

уровень интеграции организма. Так, например, величина МПК слабо коррелирует с параметрами микроциркуляции. Это может быть обусловлено тем, что МПК представляет собой комплексный показатель, обобщающий влияние трех основных компонентов: минутного объема кровообращения, кислородной емкости крови и способности мышц усваивать кислород [23]. При этом сходный уровень аэробной производительности у разных лиц может достигаться за счет различного по величине вклада каждого из вышеуказанных компонентов, и применение парной корреляции может не выявить высокой взаимосвязи между МПК и одним из параметров, относящихся к клеточному уровню организации (микроциркуляция и микрореология клеток крови). Это согласуется с результатами исследований, в которых описаны различные стратегии долговременной адаптации к аэробным мышечным нагрузкам, затрагивающие в разной мере центральный и периферический отделы сердечно-сосудистой системы [16, 24]. В представленной факторной модели выделенные факторы были интерпретированы как уровни интеграции организма, так как связывали переменные, относящиеся к определенному уровню организации. Полученные данные могут являться статистическим подтверждением интуитивно понятных, но не всегда доступных для количественной оценки факторов, влияющих на результаты парной корреляции.

Заключение

Таким образом, представленная факторная модель демонстрирует уровневую структуру связей показателей, относящихся к физической работоспособности, центральной гемодинамике, микроциркуляции, реологии крови и микрореологии эритроцитов. Наибольший факторный вес в каждом отдельно рассматриваемом факторе имели параметры, относящиеся к определенному уровню интеграции – организменному, системному, органному и клеточному.

Финансирование / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-515-00019. / Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-515-00019.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Литература / References

1. Pries AR, Secomb TW. Rheology of the microcirculation. *Clin. Hemorheol. Microcirc.* 2003; 29(3–4):143–148.
2. Huang Y, Liu A, Liang L, Jiang J, Luo H, Deng W, Lin G, Wu M, Li T, Jiang Y. Diagnostic value of blood parameters for community-acquired pneumonia. *Int Immunopharmacol.* 2018;(64):10–15. Doi: 10.1016/j.intimp.2018.08.022.
3. Martin-Ruiz C, Dickinson HO, Keys B, Rowan E, Kenny RA, von Zglinicki T. Telomere length predicts post-stroke mortality, dementia and cognitive decline. *Ann. Neurol.* 2006;(60):174–180. Doi: 10.1002/ana.20869.
4. Reinhart K, Bayer O, Brunkhorst F, Meisner M. Markers of endothelial damage in organ dysfunction and sepsis. *Crit Care Med.* 2002;30(5):302–312. Doi: 10.1097/00003246-200205001-00021.
5. Wagner K, Cameron-Smith D, Wessner B, Franzke B. Biomarkers of aging: from function to molecular biology nutrients. 2016;(8):338. Doi:10.3390/nu8060338.
6. Cohen AA, Milot E, Li Q, Bergeron P, Poirier R, Dusseault-Bélanger F, Fülöp T, Leroux M, Legault V, Metter J, Fried L, Ferrucci L. Detection of a novel, integrative aging process suggests complex physiological integration. *PLoS One.* 2015;(10):3. Doi: 10.1371/journal.pone.0116489.
7. Bartholomew D, Knotts M, Moustaki I. Latent variable models and factor analysis: a unified approach. John Wiley & Sons, 2011:296.
8. Dusseault-Bélanger F, Cohen AA, Hivert MF, Courteau J, Vanasse A. Validating metabolic syndrome through principal component analysis in a medically diverse, realistic cohort. *Metabolic Syndrome and Related Disorders.* 2013;(11):21–28. Doi: 10.1089/met.2012.0094.
9. Johnson RA, Wichern DW. Applied multivariate statistical analysis. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002:773
10. Floyd FJ, Widaman K. Factor analysis in the development and refinement of clinical assessment instruments. *Psychol Assessment.* 1995;(7):286–299. Doi: 10.1037/1040-3590.7.3.286.
11. Апанасенко Г. Л., Науменко Р. Г. Соматическое здоровье и максимальная аэробная способность индивида // Теория и практика физкультуры. – 1988. – № 4. – С. 29–31. [Apanasenko GL, Naumenko RG. Somatic health and maximum aerobic capacity of the individual. Theory and practice of physical culture. 1988;(4):29–31. (In Russ.)].
12. Белозерова Л. М. Физическая работоспособность и биологический возраст мужчин // Клини. геронтол. – 2008. – № 5. – С. 21–24. [Belozerova LM. Physical performance and biological age of men. Clinical. gerontol. 2008;(5): 21–24. (In Russ.)].
13. Kodama S, Saito K, Tanaka S, Maki M, Yachi Y, Asumi M, Sugawara A, Totsuka K, Shimano H, Ohashi Y, Yamada N, Sone H. Cardiorespiratory fitness as a quantitative predictor of all-cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women: A meta-analysis. *JAMA.* 2009;(301):2024–2035. Doi: 10.1001/jama.2009.681.
14. Baskurt OK, Meiselman HJ. Blood rheology and hemodynamics Semin. *Thromb. Hemost.* 2003;(29):435–450. Doi: 10.1055/s-2003-44551.
15. Popel AS, Johnson PC. Microcirculation and Hemorheology. *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 2005;(37):43–69. Doi. org/10.1146/annurev.fluid.37.042604.133933.
16. Муравьев А. В., Левин В. Н., Михайлов П. В. и др. Две стратегии адаптации текучести крови к потребностям организма человека при мышечной деятельности // Ярослав. педагог. вест. – 2012. – Т. 3, № 1. – С. 125–130. [Muravyov AV, Levin VN, Mikhailov PV, Muravyov AA, Osetrov IA, Bakanova IA. Two strategies for adapting blood flow to the needs of the human body during muscular activity. Yaroslavl Pedagogical Bulletin. 2012;3(1):125–130. (In Russ.)].
17. Муравьев А. В., Кислов Н. В., Тухомирова И. А. и др. Влияние вязкости плазмы и гематокрита на деформацию эритроцитов // Рос. журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17, № 2. – С. 75–83. [Muravyov AV, Kislov NV, Tikhomirova IA, Mikhailov PV, Muravyov AA. Influence of plasma viscosity and hematocrit on erythrocyte deformation. Russian Journal of Biomechanics. 2013;17(2):75–83. (In Russ.)].
18. Микроциркуляция в коже при мышечной нагрузке как модель для изучения общих механизмов изменения микрокровотока / А. В. Муравьев, А. А. Ахапкина, П. В. Му-

хайлов, А. А. Муравьев // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2014. – Т. 13, № 2 (50). – С. 64–68. [Muravyov AV, Akharkina AA, Mikhaylov PV, Muravyev AA. Microcirculation in the skin under muscular load as a model for studying the general mechanisms of microcirculation changes. Regional blood circulation and microcirculation. 2014;13(2):64–68. (In Russ.)].

19. Brun JF, Varlet-Marie E, Romain AJ, Guiraudou M, de Mauverger ER. Exercise hemorheology: Moving from old simplistic paradigms to a more complex picture. Clin. Hemorheol. Microcirc. 2013;55(1):15–27. Doi: 10.3233/CH-131686.

20. Фирсов Н. Н., Климова Н. В., Коротаева Т. В. Степень зависимости периферического кровотока от изменений микрореологических свойств крови // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2010. – Т. 9, № 4. – С. 58–62. [Firsov NN, Klimova NV, Korotaeva TV. The degree of dependence of peripheral blood flow on changes in microreological properties of blood. Regional blood circulation and microcirculation. 2010;9(4):58–62. (In Russ.)].

21. Muravyov AV, Tikhomirova IA. Role of molecular signaling pathways in changes of red blood cell deformability. Clin. Hemorheol. Microcirc. 2013;(53):45–59. Doi: 10.3233/CH-2012-1575.

22. Salazar Vázquez BY, Martini J, Chávez Negrete A, Tsai AG, Forconi S, Cabrales P, Johnson PC, Intaglietta M. Cardiovascular benefits in moderate increases of blood and plasma viscosity surpass those associated with lowering viscosity: Experimental and clinical evidence. Clin. Hemorheol. Microcirc. 2010;2(44):75–85. Doi: 10.3233/CH-2010-1261.

23. Bassett DR, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. Med Sci Sports Exerc. 2000;(32):70–84. Doi: 10.1097/00005768-200001000-00012.

24. Lepers R, Stapley PJ. Master athletes are extending the limits of human endurance. Front. Physiol. 2016;(7):613. Doi: 10.3389/fphys.2016.00613.

Информация об авторах

Михайлов Павел Валентинович – канд. биол. наук, доцент кафедры спортивных дисциплин, Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского,

г. Ярославль, Россия, e-mail: mpv.yar@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1491-3882.

Муравьев Алексей Васильевич – д-р биол. наук, профессор кафедры медико-биологических основ спорта, Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского, г. Ярославль, Россия, e-mail: alexei.47@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5502-9164.

Осетров Игорь Александрович – канд. биол. наук, доцент кафедры спортивных дисциплин, Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского, г. Ярославль, Россия, e-mail: igos@yandex.ru ORCID: 0000-0002-3269-2262.

Остроумов Роман Сергеевич – преподаватель кафедры физической подготовки, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия.

Тихомирова Ирина Александровна – д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой медицины, биологии, теории и методики обучения биологии, Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского, г. Ярославль, Россия, e-mail: tikhom-irina@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9521-4017.

Information about authors

Mikhaylov Pavel V. – Cand. of Sci. (Biol.), associate professor of the department of sports disciplines, Yaroslavl state pedagogical university named after K. D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia, e-mail: mpv.yar@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1491-3882.

Muravyov Alexey V. – Doctor of biological sciences, professor of the department of medical and biological foundations of sports, Yaroslavl state pedagogical university named after K. D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia, e-mail: alexei.47@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5502-9164.

Osetrov Igor A. – Cand. of Sci. (Biol.), associate professor of the department of sports disciplines, Yaroslavl state pedagogical university named after K. D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia, e-mail: igos@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3269-2262.

Ostroumov Roman S. – teacher of the department of physical training, Yaroslavl higher military school of air defense, Yaroslavl, Russia.

Tikhomirova Irina A. – Doctor of biological sciences, professor, head of department of medicine, biology, theory and methods of teaching biology, Yaroslavl state pedagogical university named after K. D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia, e-mail: tikhom-irina@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9521-4017.