

УДК 616-06

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ЭРГОМЕТРОВ

В.И. Павлов, Е.В. Линде, З.Г. Орджоникидзе, В.В. Николаев, В.В. Деев

Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины ДЗМ, Москва, Россия

Для связи с авторами: e-mail: mnpcsm@bk.ru

Аннотация:

Проведен сравнительный анализ динамики физиологических показателей при максимальном нагрузочном тестировании группы спортсменов на велоэргометре и бегущей дорожке (тредбан). Показано, что кроме высоких максимальных значений показателей, таких как пиковое потребление кислорода и пиковая частота сердечных сокращений, достигнутых в тредбан-тесте, обнаруживается различный характер их трендов в процессе выполнения теста. Этот факт обусловлен различным характером и амплитудой физиологических изменений при тестировании на различных типах эргометров. Данное явление имеет значение при расчете и интерпретации непрямых показателей работоспособности.

Ключевые слова: велоэргометр, тредбан, максимальный нагрузочный тест, пиковое потребление кислорода, пиковая частота сердечных сокращений.

COMPARATIVE ANALYSIS OF LOAD TESTING ON DIFFERENT TYPES OF ERGOMETERS

V.I. Pavlov, E.V. Linde, Z.G. Ordzhonikidze, V.V. Nikolaev, V.V. Deev

Moscow Research and Practice Centre of Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine, Moscow

Abstract:

The comparative analysis of dynamics of physiological indicators is carried out at the maximum exercise testing of group of athletes on bicycle ergometers and a running ergometers (treadban). It is shown that high maximum values of indicators, such as peak consumption of oxygen and peak heart rate reached in the treadban-test. Various types of physiological trends in process test performance is found out also. This fact is caused by various character and amplitude of physiological changes at exercise testing for various types ergometers. The given phenomenon matters at calculation and interpretation of indirect values of working capacity.

Key words: bicycle ergometers, running ergometers, maximal exercise testing, peak consumption of oxygen, peak heart rate.

На современном этапе развития спортивной медицины существует большое количество разнообразных тестов, направленных на определение уровня физической работоспособности спортсмена. Выбор теста зависит от многих факторов, в частности, от цели, которую предполагается достигнуть [1]. В целом же, основные назначения нагрузочного тестирования следующие [2]:

- оценка симптомов (боль в грудной клетке; приступы одышки, сердцебиений; синкопальные состояния), возникающих в процессе физической активности;
- оценка кардиореспираторной выносливости; определение наличия ишемии миокарда (аортальный стеноз, болезнь Кавасаки и др.);
- оценка реакции частоты сердечных сокращений (ЧСС) и ритма (при различных желудочковых эк-

топические ритмах, полной АВ-блокаде и др.);

– оценка эффективности реабилитационных мероприятий.

Несмотря на наличие в настоящее время большого количества различных типов эргометров (гребные эргометры, ручные эргометры, гидродинамический бассейн и др.), наиболее широко используются две их разновидности: велоэргометр и бегущая дорожка (синонимы - тредмил, тредбан). Использование каждого метода имеет как свои преимущества, так и недостатки, в зависимости от цели использования.

Цель исследования: выявить физиологические закономерности, лежащие в основе достоинств и недостатков различных типов эргометрии, на примере сравнения велоэргометрического теста и теста с использованием бегущей дорожки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Контингент – 12 членов элитной женской команды по баскетболу (чемпион России 2009).

Средний возраст – 24,7±3,1 года.

Первый день исследования - максимальное нагрузочное тестирование на велоэргометре MONARK 839 E (ВЭМ-тест) с использованием ступенчатого протокола нагрузки, мониторингом ЭКГ, АД и газоанализом. В процессе выполнения ВЭМ-теста использовался следующий протокол. Начальная нагрузка – 50 Вт, ступень – 25 Вт, продолжительность ступени – 2 мин.

Второй день (через 1 сутки после первого исследования) - повтор максимального теста на тредбане для 11 спортсменок (HP Cosmos Saturn) со ступенчатым протоколом нагрузки, мониторингом ЭКГ, газоанализом (система Oхусон Pro, Jaeger) и определение максимальной концентрации лактата.

В тредбан-тесте использовался следующий протокол нагрузки: начальная скорость бега – 7 км/час, уровень подъема дорожки - 0,2; возрастание скорости бега на следующей ступени - 1,5 км/час, подъема дорожки – на 0,1. Оценка достижения пиковых (максимальных) показателей проводилась по стандартным критериям [2, 3].

Во всех случаях максимального нагрузочного тестирования перед началом испытаний проводилась калибровка газоанализаторов с использованием газовой смеси со стандартными концентрациями O₂ и CO₂, а также осуществлялась объемная калибровка волюметра используемого прибора. Осуществление теста прекращалось в связи с утомлением спортсмена по его просьбе.

Одна спортсменка вследствие наличия патологии, выявленной во время проведения велоэргометрии (нарушение ритма сердца в виде множественных экстрасистол), была исключена из дальнейшего анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами были подтверждены особенности, важные в практической работе врача и характерные для велоэргометрического и тредбан-тестов. Наиболее важными из них мы сочли следующие закономерности.

Велоэргометрический (ВЭМ) тест

является, в большинстве случаев неспецифическим видом работы;

лимитирующим работу механизмом в тесте в большинстве случаев является локальное мышечное утомление;

для данного типа тестирования характерно, как правило, хорошее качество регистрации ЭКГ-сигнала на всех ступенях нагрузки;

имеется возможность мониторинга основных физиологических параметров (артериальное давление и др.).

Тредбан-тест

является наиболее специфичным для большинства видов спорта;

позволяет выполнить максимальную работу, лимитирующими факторами которой являются центральные, а не периферические механизмы (локальное мышечное утомление);

для данного типа теста характерны помехи в регистрации ЭКГ-сигнала на пике нагрузки;

имеются затруднения в мониторинге ряда физиологических параметров (артериальное давление и др.)

Именно в силу вышеназванных особенностей мы предпочли первоначально выполнить ВЭМ-тест (он предпочтителен для выявления патологии, но не позволяет достигнуть максимальных параметров), а затем провести тестирование на бегущей дорожке для выявления истинных резервных возможностей кардиореспираторной системы.

У одной из спортсменок на ЭКГ в покое были выявлены единичные экстрасистолы с широкими комплексами QRS, количество которых вследствие выполнения физической нагрузки увели-

Таблица 1 – Максимальные значения основных физиологических параметров в тесте

Максимальный нагрузочный тест	VO ₂ reak, мл/мин/кг	VO ₂ reak, мл/мин/кг	Мах пульс в тесте, 1/мин	Мах пульс в тесте, 1/мин
	ВЭМ	Тредбан	ВЭМ	Тредбан
Показатели (M±σ)	40,9±6,4	52,2±5,2***	171,1±6,3	183,2±5,0***

Примечание: ВЭМ – велоэргометрия; VO₂ max – пиковое потребление кислорода в тесте;

*** - p<0,001

чивалось, с переходом в пароксизм тахикардии с широкими комплексами QRS (4 желудочковых комплекса подряд). Данная спортсменка отправлена на консультацию к специалисту в специализированное аритмологическое отделение и к максимальному тредбан-тесту допущена не была.

Максимальное (пиковое) потребление кислорода и максимальный (пиковый) пульс (максимальная, или пиковая, частота сердечных сокращений) являются наиболее часто контролируемыми показателями у спортсменов [4,5,6]. Средние значения этих параметров оказались выше при выполнении тредбан-теста: потребления кислорода – на 11,3 мл/мин/кг, а пульса – на 12 уд./мин (табл. 1).

При более подробном анализе показатели максимальной (пиковой) аэробной для каждой спортсменки производительности, выражающиеся в значениях максимального (пикового) потребления кислорода, видно, что у ряда баскетболисток в тредбан-тесте значения этого показателя стремились к 60 мл/мин/кг, а в одном случае это значение было превышено (рис. 1). В то же время в ходе проведения ВЭМ теста значения максимального (пикового) потребления кислорода почти у половины спортсменок не достигали значения 40 мл/мин/кг.

Таким образом, подтверждался факт того, что максимальную аэробную производительность у лиц в игровых видах спорта (в частности, у спортсменок-баскетболисток) более целесообразно определять в условиях тредбан-теста [7].

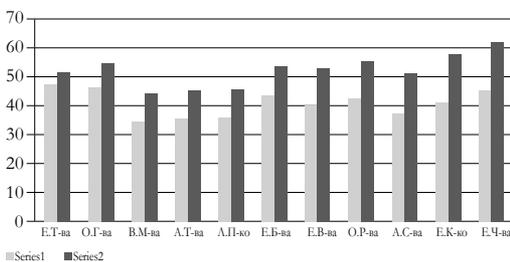


Рис. 1. Значения максимального (пикового) потребления кислорода у спортсменок при выполнении нагрузки на разных типах эргометров.

Примечание: левые столбики – ВЭМ-тест; правые столбики – тредбан-тест

Соотношение трендов зависимостей основных параметров нагрузочного тестирования у всех спортсменок носило схожий характер,

поэтому для подробного анализа мы выбрали графики значений у одной из баскетболисток.

В графиках частоты сердечных сокращений (ЧСС) на велоэргометре и на тредбане прослеживались следующие закономерности (рис. 2):

- 1) тренд ЧСС в ходе ВЭМ-теста обрывался во время более низких значений потребления кислорода в сравнении с тредбан-тестом;
- 2) на каждой конкретной ступени нагрузки ВЭМ-теста более высоким цифрам ЧСС соответствовали меньшие значения потребления кислорода в сравнении с тредбан-тестом.

Данное явление, вероятно, обусловлено тем, что в ходе выполнения тредбан-теста в работу включено большее количество скелетной мускулатуры. Следовательно, при выполнении теста на бегущей дорожке требуется больший уровень кровоснабжения мышц в целом, что обуславливает включение большего объема циркулирующей крови (ОЦК). Большой ОЦК, в свою очередь, обуславливает более полную реализацию эффекта Старлинга, когда в большей степени идет возрастание инотропности сердечной мышцы (увеличивается, в основном, ударный объем) в сравнении с более высокими значениями хронотропности миокарда в ВЭМ-тесте (возрастает, в основном, ЧСС).

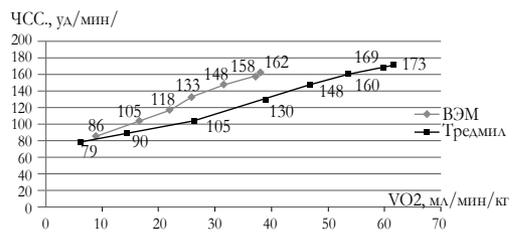


Рис. 2. График зависимости частоты сердечных сокращений (ЧСС) от потребления кислорода (VO2) у баскетболистки С., 22 года

Интересным, с нашей точки зрения, является анализ зависимости ЧСС от мощности выполняемой нагрузки (W). Мощность, как известно, представляет собой скорость совершения работы (работа, осуществляемая в единицу времени). Здесь одним из важных аспектов является то, что если при про-

ведении ВЭМ-теста мощность является задаваемым параметром, то при выполнении тредбан-теста – расчетным. На бегущих дорожках фирмы Jaeger используется следующая формула расчета мощности:

$$Watt = (V * BW * (2.11 + G * 0.25) + 2.2 * BW - 151) / 10.5,$$

где *Watt* – рассчитываемая мощность; *V* – скорость движения полотна; *BW* (body weight) – масса тела; *G* – угол наклона в %

На графике зависимости ЧСС от мощности нагрузки можно видеть следующее (рис. 3):

- 1) более раннее отклонение данного тренда от прямолинейной зависимости («искривление») в случае выполнения нагрузки на велоэргометре;
- 2) соответствие большей мощности нагрузки в ходе выполнения ВЭМ-теста большей ЧСС, которая при высоких мощностях приближается к ЧСС в тредбан-тесте;
- 3) достижение меньшей максимальной (пиковой) ЧСС и меньшей мощности нагрузки в ходе выполнения ВЭМ-теста.

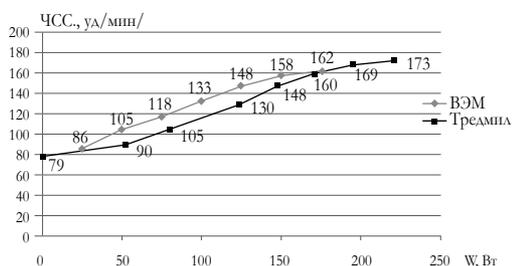


Рис. 3. График зависимости частоты сердечных сокращений (ЧСС) от мощности (W) выполняемой работы у баскетболистки С., 22 года

Анализ описанных особенностей еще раз подтверждает тот факт, что вследствие участия меньшего объема мышц и меньшего ОЦК при выполнении ВЭМ теста менее выражен эффект Старлинга, что выражается в выполнении работы указанной мощности при более высоких цифрах ЧСС (следовательно, при меньших значениях ударного объема) [8]. Более раннее искривление тренда ЧСС относительно мощности работы в ВЭМ-тесте говорит о подключении к процессу кислородного энергообеспечения анаэробного лактатного энергоисточника и наступлении

локального мышечного утомления. Так как в тредбан-тесте в работе принимает участие больший массив мышц, отклонение графика ЧСС от прямолинейной зависимости вследствие подключения анаэробного лактатного энергоисточника наступает позже. Подобный изгиб графика ЧСС получил наименование точки *Conconi* (по имени итальянского исследователя), после наступления которой спортсмен может выполнять работу лишь непродолжительное время из-за локального либо системного снижения рН, участвующего в генезе утомления.

В практическом плане данный тип трендов имеет значение в непрямом определении работоспособности спортсменов, согласно так называемому тесту PWC (physical working capacity), по которому, чем больше мощность работы, которую спортсмен выполняет, или мог бы выполнить в режиме постоянной работы (steady state) на данном уровне пульса, тем более высокой работоспособностью он обладает. Как правило, используют определение PWC 170, то есть мощности работы на пульсе 170 уд./мин.

При этом условно полагают, что зависимость ЧСС от мощности работы до уровня пульса, равного 170 уд./мин., является прямолинейной (рис. 4).

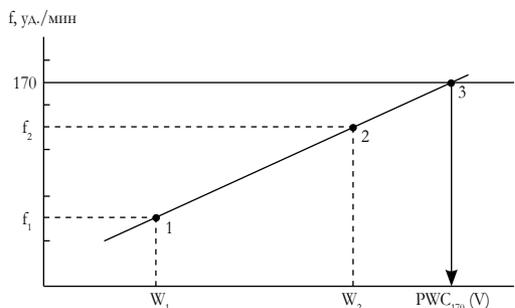


Рис. 4. Вычисление PWC 170 графическим методом (по Карпману В.Л.) [9]

Соответственно, показатель PWC 170 может быть вычислен по следующей формуле [9,10]:

$$PWC170 = W_1 + (W_2 - W_1) * \frac{170 - f_1}{f_2 - f_1},$$

где

W – мощность выполняемой работы, *f* – частота сердечных сокращений.

Однако, как видно из рисунка 3, график зависимости ЧСС от мощности работы отклоняется от прямолинейной зависимости тем больше, чем большую мощность работы выполняет спортсмен. Более выражен этот феномен при тестировании на велоэргометре, где спортсмен часто не достигает данного уровня ЧСС, хотя, казалось бы, прямой расчет PWC (т.е., непосредственное определение мощности по достижении данного уровня пульса) выглядел бы оптимальным способом определения работоспособности.

В связи с этим выглядит разумным выявление закономерностей тех погрешностей, к которым может привести не прямое определение работоспособности по двум точкам на кривой «W – ЧСС» (табл. 2).

Как видно из таблицы 2, чем дальше на графике взяты точки, тем выше оказывается уровень расчетной работоспособности спортсменки. Особенно это выражено при выполнении ВЭМ-теста. Расчетные показатели PWC 170 в тредбан-тесте оказываются более стабильными, вследствие того что прямолинейная зависимость ЧСС от мощности нагрузки сохраняется достаточно долго. Однако она не соблюдается до уровня пульса 170 уд./мин, в связи с чем прямое определение показателя PWC 170 на дорожке также оказывается немного выше расчетного.

На графике зависимости VO2 от мощности нагрузки отображаются следующие закономерности (рис. 5):

- 1) прямолинейный характер данной зависимости на всех участках тренда при выполнении тредбан-теста и выраженное искривление графика по окончании выполнения ВЭМ-теста;
- 2) постепенное уменьшение потребления кислорода на единицу мощности в ходе выполнения ВЭМ-теста;

полнения ВЭМ-теста;

- 3) меньшие конечные значения VO2 и мощности выполненной нагрузки в ВЭМ-тесте.

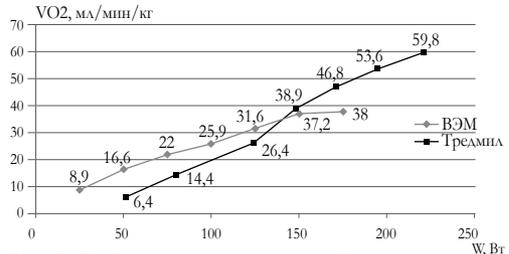


Рис. 5. График зависимости потребления кислорода (VO2) от мощности (W) выполняемой работы у баскетболистки С., 22 года

Ход полученных трендов свидетельствует о большей роли системы аэробного энергообеспечения при выполнении тредбан-теста, функция которой продолжает равномерно нарастать и роль которой в данном процессе не снижается до самого окончания теста.

В то же время удельная доля аэробной системы энергообеспечения по ходу выполнения ВЭМ-теста снижается, о чем говорит меньшее нарастание потребления кислорода на единицу мощности выполненной работы к концу теста. Следовательно, в этот период работа в значительной мере совершается за счет локальных потенциалов периферической скелетной мускулатуры, поддерживаемой аэробной лактатной системой энергообеспечения.

Так как при ВЭМ-тесте анаэробный лактатный источник подключается раньше, то и процессы, ведущие к локальному мышечному утомлению, прогрессируют быстрее. Этим и обусловлены меньшие значения максимальных физиологических параметров при данном типе эргометрии.

Таблица 2 – Пример непрямого определения PWC170 (без пересчета на единицу массы тела) по двум точкам на графике зависимости частоты сердечных сокращений от мощности выполняемой нагрузки (баскетболистка С., 22 года).

Положение точек графика	ВЭМ-тест			Тредбан-тест		
	f1 - f2 уд./мин	W1 - W2, уд./мин	PWC 170, Вт	f1 - f2 уд./мин	W1 - W2, уд./мин	PWC 170, Вт
Начало	118 - 148	75 - 125	162	90 - 130	90 - 130	170
Середина	148 - 158	125 - 150	180	130 - 160	130 - 160	170
Конец	158 - 162	150 - 175	225	Прямое определение - 195 Вт		

Примечание: W – мощность выполняемой работы, f – частота сердечных сокращений, PWC 170 – мощность работы на пульсе 170 уд./мин (расчетный, либо прямой способ определения)

Практическое значение анализа зависимости потребления кислорода от мощности нагрузки на данной ступени имеет несколько аспектов. Один из них – определение расчетного значения максимального потребления кислорода в непрямом тесте. Так, считается, что уровень максимального потребления кислорода можно рассчитать с минимальной ошибкой, используя метод прямой линейной регрессии. При этом предполагается, что механическая мощность выполняемой работы имеет сильную прямую корреляцию с потреблением кислорода, что часто позволяет в клинической медицине именовать показатель максимального потребления кислорода «максимальной аэробной мощностью». Для определения максимального потребления кислорода по результатам теста PWC 170 наиболее часто используется формула, предложенная Карпманом В.Л. [11, 12]:

$$VO_{2max} = 1,7 * PWC170 + 1240, \text{ где}$$

VO_{2max} – максимальное потребление кислорода; PWC170 – показатель расчетной (или прямой) мощности нагрузки в тесте с определением PWC170.

Тем не менее, как видно из рисунка 5, данный способ расчета будет давать меньшую ошибку при выполнении тредбан-теста, так как в этом случае график зависимости более четко сохраняет прямолинейный характер. Напротив, при выполнении ВЭМ-теста подобный способ определения максимального

потребления кислорода будет давать более весомую погрешность.

ВЫВОДЫ

- Если применение нагрузочного тестирования на велоэргометре более приемлемо в клинической медицине (возможность адекватного мониторинга большинства физиологических параметров при меньшей нагрузке на сердечно-сосудистую систему), то тредбан-тест обеспечивает достижение показателей, более приближенных к максимальным, в сравнении с ВЭМ-тестом, что делает его более пригодным для определения физической работоспособности у здоровых лиц.
- В тредбан-тесте обеспечивается достижение большего уровня потребления кислорода (VO_2) при меньших цифрах ЧСС, что говорит о большем вкладе в физиологический механизм выполнения нагрузки эффекта Старлинга.
- Для тредбан-теста характерна более тесная взаимосвязь между потреблением кислорода и мощностью выполняемой нагрузки, имеющая, большей частью, прямолинейную зависимость в отличие от велоэргометрического теста, где данную закономерность нарушают процессы локального мышечного утомления.
- Значения PWC170, полученные прямым путем, как правило, всегда выше полученных расчетным способом, причем в большей степени это выражено при выполнении ВЭМ-теста, где тренд «ЧСС-мощность» более рано и резко отклоняется от прямолинейной зависимости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Astrand, P.O. Text Book of Work Physiology: Physiological basis of exercise / P.O. Astrand, K. Rodahl. – New York : McGraw Hill. – 1986.
2. Wasserman, K. Exercise testing and interpretation / K. Wasserman, J.E. Hansen, D.Y. Sue et al. – Lippincott Williams & Wilkins. – 2005. – 586 p.
3. Орджоникидзе, З.Г. Состояние функциональной подготовленности спортсменов из состава ведущих футбольных команд России / З.Г. Орджоникидзе, В.И. Павлов, Н.И. Волков, А.Е. Дружинин // Физиология человека. – 2007. – 33 (4). – С. 114-118.
4. Volkov, N.I. Bioenergetics of sports activities / N.I. Volkov. – Moscow, 2010. – P. 141.
5. Волков, Н.И. Физиология человека / Н.И. Волков, О.И. Попов, И.А. Савельев, А.Г. Самборский. – 2003. – Т. 29. № 2. – С. 91-97.
6. Руненко, С.Д. Исследование и оценка функционального состояния спортсмена / С.Д. Руненко, Е.А. Таламбум, Е.Е. Ачкасов. – М., 2010. – 72 с.
7. Пападопулос, К. Использование эргоспирометрии в профессиональном футболе / К. Пападопулос // Актуальные вопросы спортивной медицины : сборник под ред. И.Б. Медведева. – М. – 2010. – С. 78-85.
8. Белоцерковский, З.Б. Динамика внутренней поверхности полости левого желудочка сердца у спортсменов / З.Б. Белоцерковский // Клинико-физиологические характеристики сердечно-сосудистой системы у спортсменов : сборник посвященный двадцатипятилетию каф. спорт. медицины им. проф. В.Л. Карпмана. – М. : РФАФК. – 1994. – С. 154-161.
9. Карпман, В.Л. Тестирование в спортивной медицине

- / В.Л. Карпман, З.Б. Белоцерковский, И.А. Гудков. – М.: ФиС, 1988. – 208 с.
10. Белоцерковский, З.Б. Эргометрические и кардиологические критерии физической работоспособности спортсменов / З.Б. Белоцерковский. – М.: Советский спорт, 2005. – 312 с.
11. Карпман, В.Л. Непрямое определение максимального потребления кислорода у спортсменов высокой квалификации / В.Л. Карпман, И.А. Гудков, Г.А. Койдинова // Теория и практика физической культуры. – 1972. – № 1. – С. 37-41
12. Макарова, Г.А. Практическое руководство для спортивных врачей / Г.А. Макарова. – Ростов-на-Дону : БАРО-ПРЕСС, 2002. – 800 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлов Владимир Иванович – доктор медицинских наук, заведующий отделением функциональной диагностики и врачебного контроля Московского научно-практического центра медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины

Линде Елена Викторовна – кандидат медицинских наук, заведующая лабораторией функциональной диагностики спортсменов Московского научно-практического центра медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины ДЗМ

Орджоникидзе Зураб Гивиевич – доктор медицинских наук, профессор, главный специалист департамента здравоохранения города Москвы.

Николаев Виталий Витальевич – врач отделения функциональной диагностики и врачебного контроля за функциональным состоянием спортсменов Московского научно-практического центра медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины.

Деев Вадим Владимирович – врач Московского научно-практического центра медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины.