

УДК 616-092.6

Гендерные различия диастолического артериального давления и вегетативной регуляции сердечного ритма на разных величинах дополнительного респираторного сопротивления

Бяловский Ю.Ю., Ракитина И.С., Абаленихина Ю.В., Щулькин А.В.

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации
390000, Рязань, ул. Полонского, д. 13

Интенсивная работа инспираторных мышц может вызвать стимулированный метаболитами прессорный рефлекс, обычно называемый метаборефлексом дыхательных мышц.

Цель исследования – оценка половых различий диастолического артериального давления (ДАД) и вегетативной регуляции сердечного ритма (ВРСР) при генерации метаборефлекса дыхательных мышц на разных величинах дополнительного респираторного сопротивления (ДРС).

Материалы и методы. Здоровые молодые мужчины ($22,4 \pm 3,8$ года, $n = 34$) и женщины ($21,5 \pm 3,8$ года, $n = 28$) проходили тестирование функции внешнего дыхания, оценку ВРСР и непрерывную регистрацию ДАД на протяжении 10 мин на фоне моделирования ДРС величиной 40 и 60% максимального внутриротового давления (Рт_{max}).

Результаты. Отмечались исходные половые различия ДАД: показатели мужчин превышали таковые у женщин. 10-минутное предъявление ДРС величиной 40% Рт_{max} показало незначительную зависимость ДАД от пола. На величине 60% Рт_{max} у мужчин наблюдалась наибольшая степень превышения показателей женщин: среднее значение ДАД мужчин составляло 91 ± 4 мм рт.ст, при средних значениях ДАД у женщин 82 ± 5 мм рт.ст ($p = 0,042$). Наиболее выраженные различия в показателях давления у мужчин и женщин отмечены в первые три минуты после включения резистивного дыхания 60% Рт_{max}. Такие изменения ДАД у мужчин сопровождались более выраженным по сравнению с женщинами повышением показателей ВРСР, характеризующими уровень симпатических влияний.

Заключение. Реакция ДАД на стандартизированную работу инспираторных мышц у женщин менее выражена и происходит на фоне менее выраженной, чем у мужчин, симпатической реакции.

Ключевые слова: диастолическое артериальное давление; вегетативная регуляция сердечного ритма; дополнительное респираторное сопротивление.

Для цитирования: Бяловский Ю.Ю., Ракитина И.С., Абаленихина Ю.В., Щулькин А.В. Гендерные различия диастолического артериального давления и вегетативной регуляции сердечного ритма на разных величинах дополнительного респираторного сопротивления. Патогенез. 2025; 23(3): 76–83

DOI: 10.48612/path/2310-0435.2025.03.76-83

Для корреспонденции: Бяловский Юрий Юльевич, e-mail: b_uu@mail.ru

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при подготовке статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила: 18.08.2025.

Gender differences in diastolic blood pressure and autonomic regulation of heart rate at different values of additional respiratory resistance

Byalovsky Yu.Yu., Rakitina I.S., Abalenikhina Yu.V., Shchulkin A.V.

Academician I.P. Pavlov Ryazan State Medical University
Polonskiy Str. 13, Ryazan 390000, Russian Federation

Intensive work of the inspiratory muscles can cause a metabolite-stimulated pressor reflex, commonly referred to as the respiratory muscle metaboreflex.

The aim of the study is to evaluate gender differences in diastolic blood pressure (DBP) and autonomic regulation of heart rhythm (ARHR) during the generation of the metaboreflex of the respiratory muscles at different values of additional respiratory resistance (ARR).

Materials and Methods. Healthy young men (22.4 ± 3.8 years, $n = 34$) and women (21.5 ± 3.8 years, $n = 28$) underwent lung function testing, ARHR assessment, and continuous recording of DB against the background of ARR modeling, which was used as inspiratory resistive loads at values of 40 and 60% of maximal intraoral pressure (P_{mmax}) for 10 min.

Results. The initial gender differences in DBP were noted: the indicators of men exceeded those of women. A 10-minute presentation of DRS with a value of 40% P_{mmax} showed a slight dependence of DBP on gender. At 60% P_{mmax}, men had the highest degree of excess over women: the average DBP in men was 91 ± 4 mmHg, with an average DBP in women of 82 ± 5 mmHg ($p = 0.042$). The most pronounced differences in blood pressure in men and women were noted in the first three minutes after resistive breathing was activated at 60% P_{mmax}. Such changes in DBP in men were accompanied by a more pronounced increase in BPSR indicators, which characterize the level of sympathetic influences, compared with women.

Conclusions. The DBP response to the standardized work of the inspiratory muscles in women is less pronounced and occurs against a background of a less pronounced sympathetic reaction than in men.

Key words: diastolic blood pressure; autonomic regulation of heart rate; additional respiratory resistance.

For citation: Byalovsky Yu.Yu., Rakitina I.S., Abalenikhina Yu.V., Shchulkin A.V. [Gender differences in diastolic blood pressure and autonomic regulation of heart rate at different values of additional respiratory resistance]. *Patogenet [Pathogenesis]*. 2025; 23(3): 76–83 (in Russian)

DOI: 10.48612/path/2310-0435.2025.03.76-83

For correspondence: Byalovsky Yuri Yulieovich, e-mail: b_uu@mail.ru

Funding. This work was not supported by any external sources of funding.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received: 18.08.2025.

Введение

Интенсивная работа инспираторных мышц на фоне дополнительного респираторного сопротивления (ДРС) может вызвать стимулированный метаболитами прессорный рефлекс [1], широко известный как метаборефлекс дыхательных мышц. Во время сокращений преимущественно инспираторных мышц накапливающиеся метаболиты активируют афферентные волокна группы III/IV, которые увеличивают эфферентную симпатическую активность, повышают активность ренин-ангиотензин-альдостероновой системы, тем самым увеличивая перфузию дыхательных мышц в основном за счёт перераспределения кровотока из скелетных (локомоторных) мышц [1, 2]. Следовательно, метаболическая чувствительность афферентных волокон дыхательных мышц может оказывать существенное влияние на общий сердечно-сосудистый контроль, уменьшая и перенаправляя кровоток из относительно неактивной сосудистой скелетной мускулатуры в нагруженную сеть дыхательной мускулатуры [3]. Считается, что метаборефлекс наиболее выражен у мужчин, в силу более значительного резерва внутриорганного кровотока, который может быть использован для кровоснабжения нагруженной дыхательной мускулатуры [4]. В этой связи имеется ряд данных, которые описывают [5] меньшую реакцию артериального давления у женщин на работу инспираторных мышц, относительно эквивалентной работе дыхательных мышц у мужчин.

Половые различия в ответе на высокие уровни резистивного дыхания могут быть связаны с более низкими уровнями симпатической активации и тканевой концентрации сосудистой сети [6] у женщин по сравнению с мужчинами. Для стандартизации симпатической активности сосудов конечности используют дозированную физическую нагрузку. Так, в случае мониторирования АД в локтевой артерии, чаще всего применяют стандартизированную статическую кистевую динамометрическую нагрузку [7]. Для оценки перфузионной функции периферической сосудистой системы скелетных мышц наиболее часто используют непрерывную динамику диастолического артериального давления (ДАД). В одной из ключевых задач работы нам предстояло определить, отличаются ли изменения ДАД и вегетативная регуляция сердечного ритма (ВРСР) на относительно одинаковые уровни работы инспираторных мышц у мужчин и женщин.

Высокий уровень работы дыхательных мышц на действие ДРС имеет сердечно-сосудистые последствия, которые могут повлиять на общее распределение кровотока в состоянии покоя [8]. Хотя описанные половые различия в реакции метаборефлекса, по-видимому, симпатически опосредованы, неясно, изменяется ли гемодинамика скелетных мышц руки на фоне статической кистевой нагрузки. Поэтому **целью данного исследования** было определить, имеются ли половые различия уровня ДАД и уровня ВРСР при генерации метаборефлекса дыхательных мышц на разных величинах дополнительного респираторного сопротивления.

Материалы и методы исследования

Этическое одобрение. Перед началом тестирования у всех участников было получено письменное и устное информированное согласие. Экспериментальные процедуры были одобрены локальным комитетом Рязанского государственного медицинского университета (протокол №11 от 5.10.2018). Все процедуры соответствовали Хельсинской декларации об экспериментах на людях, за исключением регистрации в базе данных.

Характеристики участников. В исследовании согласились принять участие 62 человека: мужчины ($22,4 \pm 3,8$ года, $n = 34$) и женщины ($21,5 \pm 3,8$ года, $n = 28$). Непрерывная регистрация ДАД и оценка ВРСР осуществлялась у всех участников. Все участники считались здоровыми, учитывая их индекс массы тела ($24,2 \pm 2,8$ кг/м²), функцию лёгких в состоянии покоя в пределах прогнозируемых значений и отсутствие в анамнезе сердечно-лёгочных заболеваний. Использование контрацептивов в этом исследовании не контролировалось, но женщины проходили тестирование либо во время указанной ими низкой гормональной фазы менструального цикла (ранняя фолликулярная), либо во время фазы «отвывания» от использования контрацептивов. В частности, пациентки с нормальным циклом, не применявшим какие-либо средства контрацепции, или пациентки с нормальным циклом и имплантированной внутриматочной спиралью проходили тестирование в раннюю фолликулярную фазу (с 1-го по 8-й день после начала менструации). Пациентки, применявшим оральные контрацептивы, проходили тестирование в период «отвывания» от контрацептивного цикла. Пациентки с нерегулярным или отсутствующим циклом (при использовании контра-

цептивов, вызывающих аменорею) и мужчины проходили тестирование в любое время.

Дизайн эксперимента. Исследование проводилось в течение двух визитов. Перед каждым визитом участники воздерживались от употребления алкоголя в течение 24 часов, не занимались физическими упражнениями в течение 12 часов и не употребляли кофеин в течение 2 часов перед тестированием. Во время первого визита были получены антропометрические данные участников, а также проведена оценка функции лёгких в состоянии покоя с помощью спироанализатора Spipolab III SpO2 (Италия) [9].

Применение увеличенных дыхательных сопротивлений требовало нормирования интенсивности предъявляемых резистивных нагрузок. В качестве методического приема для стандартизации ДРС в нашем исследовании использован принцип стандартизации резистивных нагрузок, исходя из максимального внутриторового давления, формируемого при максимально мощном вдохе на фоне полностью закрытых рте и носе – 100% Pmax [10]. Использовались следующие ДРС: 40 и 60% Pmax. Рабочее время, на протяжении которого осуществлялось резистивное дыхание, составляло 10 мин. Pmax определялось с помощью мановакуометра WIKA-2-75. Участников просили держать измерительный прибор обеими руками и плотно сомкнуть губы вокруг фланцевого мундштука во время измерения. Для теста участника просили выдохнуть как можно глубже (до уровня остаточного объёма), а затем сделать максимальный вдох в течение более одной секунды. Во время теста испытуемые делали три измерения, и оценивалось самое высокое из них. Тестирования проводили на фоне кистевой нагрузки, что позволяет выделить нейроваскулярные эффекты инспираторной мускулатуры [1, 2].

Непрерывная регистрация диастолического артериального давления. Осуществлялась с помощью оригинального способа и устройства [11, 12]. В месте максимальной пульсации плечевой артерии с помощью фиксатора Потена устанавливали и компрессировали локальный окклюзионный пелот. При этом исключается циркулярная компрессия сосудов конечности, что устраняет венозный тоновый сдвиг и повышает точность и продолжительность времени непрерывной регистрации диастолического артериального давления. Звуковые сигналы в виде тонов Короткова регистрировали микрофоном проксимальнее места наложения пелота. Выделение характеристического сигнала, отражающего уровень диастолического давления, проводили на уровне IV-III фаз звуковых компрессионных явлений Короткова.

Изменения вегетативной регуляции сердечного ритма. Показатели вариабельности сердечного ритма (ВСР) анализировались и обрабатывались посредством автоматизированного комплекса «Варикард» [13]. При статистической обработке показателей ВСР анализу подвергались следующие параметры: ЧСС – частота сердечных сокращений, уд/мин; MxDMn – вариационный размах, различие между максимальным и минимальным значением кардиоинтервалов, мс; SDNN – стандартное отклонение интервалов NN, отражающее циклические компоненты, ответствен-

ные за изменчивость кардиоинтервалов, мс; RMSSD – квадратный корень из суммы разностей последовательности ряда кардиоинтервалов NN, показатель активности парасимпатического звена вегетативной регуляции, отражающий активность автономного контура регуляции, мс; Mo – мода, представляет значение изучаемого признака, повторяющееся с наибольшей частотой, мс; Amo – амплитуда моды, число кардиоинтервалов, соответствующих значению моды, в процентах к объёму выборки; SI – индекс напряжения регуляторных систем, характеризующий степень преобладания активности центральных механизмов регуляции над автономными, усл.ед; TP – суммарная мощность (Total Power) спектра ВСР, которая отражает мощность колебаний с частотой от 0,003 до 0,5 Гц, то есть общую вариабельность сердечного ритма, мс²; LF – мощность медленных волн первого порядка в диапазоне 0,15 – 0,04 Гц в спектре ВСР, или симпатическая модуляция сердечного ритма, мс²; VLF – мощность медленных волн второго порядка в диапазоне 0,04 – 0,015 Гц в спектре ВСР, которая отражает участие нейрогуморального регулирования в управлении работой сердца, мс²; LF/HF – отношение мощности низкочастотного спектра к мощности высокочастотного спектра, усл. ед; IC индекс централизации – отражающий баланс между активностью сегментарного и надсегментарного контуров вегетативного управления, усл. ед.

Статистический анализ. Статистический анализ проводился с помощью статистического пакета SPSS версии 22 (США). Размер выборки был определен априори (вероятность ошибки $\alpha = 0,05$, вероятность ошибки $1-\beta = 0,95$). Тесты Шапиро-Уилка для основных зависимых переменных (ДАД, ВСР) показали, что данные соответствуют нормальному распределению (все значения $p > 0,05$). Мощность оценивалась по общей реакции ВСР и ДАД после запуска метаборефлекса у мужчин и женщин на ДРС 40 и 60% Pmax. Непарные t-тесты были выполнены для сравнений на основе пола в антропометрических данных, лёгочных параметров, показателей вегетативной регуляции сердечного ритма, а также для изменения ДАД на фоне статической физической нагрузки. Непарные t-тесты с равной дисперсией были выполнены для определения разницы между полами в ответе на активацию метаборефлекса. Для оценки различий показателей ВСР и ДАД, зависящих от пола, использовался двухфакторный смешанный дисперсионный анализ. Значение $p < 0,05$ считалось статистически значимым. Все данные представлены в виде среднего значения со стандартным отклонением ($M \pm SD$).

Результаты исследования

Антропометрические и респираторные характеристики участников представлены в **табл. 1**.

Мужчины и женщины были близкого возраста ($p = 0,240$). Мужчины, обладая более высоким ростом ($p = 0,037$), характеризовались более высокими величинами функциональных показателей лёгких, в частности ФЖЕЛ ($p = 0,050$) и ОФВ1 ($p = 0,043$). Абсолютные и про-

Таблица 1.

Морфометрические и легочные функциональные показатели групп испытуемых.

Показатель	Мужчины	Женщины	<i>p</i>
Число участников, чел	34	28	
Возраст (лет)	23,70±7,4	22,56±8,81	0,240
Масса тела (кг)	76,10±11,07	64,22±13,01	0,170
Рост (см)	177,55±7,01	164,56±5,72	0,037
ФЖЕЛ (л)	4,95±0,41	4,15±0,38	0,050
ФЖЕЛ, % должн.	105,6±14,8	93,8±12,5	0,087
ОФВ1 (литр/сек)	4,62±0,48	3,37±0,59	0,043
ОФВ1 %, должн.	114,2±18,3	126,5±13,6	0,083
0%Pmmax, см вд.ст./л/с	2,34±1,8	1,58±2,43	0,142
40%Pmmax, см вд.ст./л/с	32,43±16,4	28,9±14,9	0,128
60%Pmmax, см вд.ст./л/с	58,72±21,4	54,1±18,86	0,235

Обозначения показателей: ФЖЕЛ – формированная жизненная емкость; ОФВ1 – объём форсированного выдоха за 1 сек; 0%Pmmax – максимальное внутриротовое давление при свободном дыхании; 40%Pmmax – максимальное внутриротовое давление в 40% от максимума; 60%Pmmax – максимальное внутриротовое давление в 60% от максимума.

центные показатели максимального внутриротового давления (Pmmax), как в состоянии отсутствия ДРС – Pmmax 0%, так и на Pmmax 40% и 60% у мужчин и женщин статистически не различались ($p = 0,074$; $p = 0,128$; $p = 0,235$ соответственно).

Гендерные особенности изменений вариабельности сердечного ритма в условиях увеличенного сопротивления дыханию. На рис. 1. приведены изменения показателей ВСР при действии ДРС (40% Pmmax) у женщин (голубые столбики) и мужчин (оранжевые столбики). Из представленных результатов вытекает, что к окончанию действия минимальной градации ДРС 40% Pmmax среди показателей ВСР у мужчин обнаруживается тенденция к увеличению индекса напряжения регуляторных систем SI, при снижении вариационного размаха MxDMn ($p < 0,05$), относительно женщин, что указывает на больший сдвиг вегетативной нервной регуляции в сторону симпатической активности у мужчин. Анализ спектрально-волновых характеристик ВСР также свидетельствует об усилении вклада симпатической составляющей в регуляцию сердечно сосудистой системы у представителей мужского пола по отношению к женскому: снижаются значения высокочастотной составляющей (HF, $p < 0,05$) от исходного к постнагрузочному уровню и повышается индекс централизации (IC, $p < 0,05$).

Таким образом, генерация метаборефлекса на минимальной градации ДРС (40%Pmmax) у представителей мужского пола включает механизмы адаптационного напряжения, характеризующегося признаками симпатической активации сердечного ритма, с уменьшением автономного и дыхательного контуров саморегуляции управления ритмом сердца. Подобная картина характерна для стресс-реакции и характеризует типовую реакцию организма на нагрузочное тестирование.

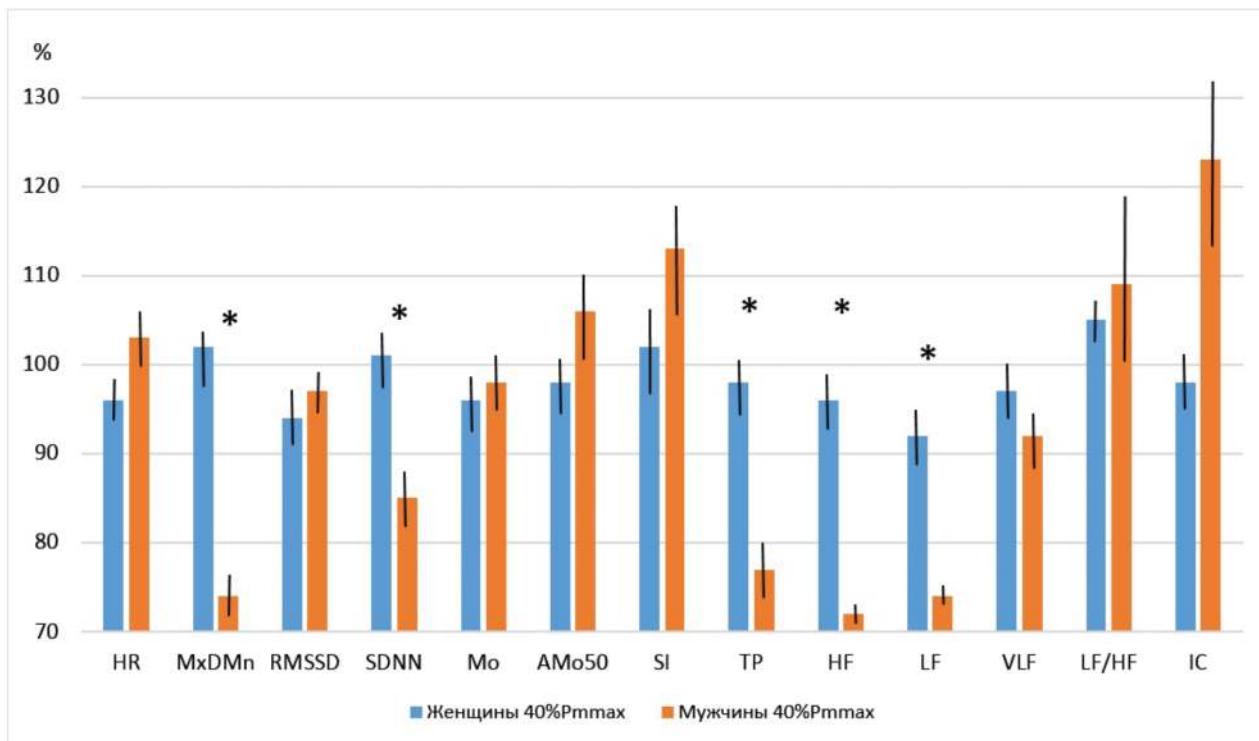


Рис. 1. Изменение показателей вариабельности сердечного ритма у испытуемых женского и мужского пола при действии дополнительного респираторного сопротивления 40% Pmmax. Обозначения показателей см. в тексте, статистическая значимость межгрупповых различий: * – $p < 0,05$.

На **рис. 2** приведены изменения показателей ВСР при действии ДРС (60% P_{mmax}) у женщин (голубые столбики) и мужчин (оранжевые столбики). Действие ДРС 60% P_{mmax} приводит к более существенному (относительно 40% P_{mmax}) росту показателей ЧСС у мужчин ($p < 0,001$), индекса напряжения регуляторных систем – SI ($p < 0,05$), при снижении вариационного размаха – MxDMn ($p < 0,01$), моды – Mo ($p < 0,05$) и показателя активности парасимпатического звена вегетативной регуляции – RMSSD ($p < 0,05$), что указывает на статистически значимый сдвиг вегетативной нервной регуляции в сторону симпатической активности именно у представителей мужского пола. Анализ спектрально-волновых характеристик ВСР указывает на усиление вклада симпатической составляющей в регуляцию сердечно-сосудистой системы мужчин: снижаются значения высокочастотной составляющей – HF ($p < 0,001$) от исходного к постнагрузочному уровню и повышаются величины отношения мощности низкочастотного спектра к мощности высокочастотного спектра – LF/HF ($p < 0,05$), и индекса централизации – IC ($p < 0,05$). Таким образом, переход от умеренной к значительной величине ДРС характеризуется ростом централизации регуляции сердечно-гого ритма и признаками симпатической активации преимущественно у представителей мужского пола.

Проведена оценка поминутной динамики ДАД в плечевой артерии в условиях статической кистевой нагрузки 20% от максимума при 10-минутном резистивном дыхании на дополнительном респираторном сопротивлении 40 и 60 % P_{mmax} у мужчин и женщин.

Первоначально мы оценивали значения ДАД у мужчин и женщин до предъявления ДРС (0% P_{mmax}). Как следует из представленных результатов (**рис. 3**), отмечались исходные межполовые различия ДАД: значения ДАД у мужчин перед предъявлением 60% P_{mmax} превышали таковые у женщин (ДАД) на $3,4 \pm 1,2$ мм рт. ст. ($p = 0,042$).

10-минутное предъявление ДРС величиной 40% P_{mmax} выявило незначительные различия ДАД у мужчин и женщин (**рис. 4, А**). Так, средняя величина ДАД мужчин составляла 87 ± 6 мм рт.ст. против 80 ± 4 мм рт.ст. у женщин ($p = 0,062$), при этом наибольшие достоверные половые отличия ДАД наблюдались в течение первых четырёх минут после включения резистивного дыхания 40% P_{mmax}.

На величине 60% P_{mmax} у мужчин наблюдался наибольший рост ДАД относительно показателей женщин (**рис. 4, Б**). Среднее значение ДАД мужчин составляла 91 ± 4 мм рт.ст., при средних значениях ДАД у женщин 82 ± 5 мм рт.ст. ($p = 0,042$). Наиболее выраженные различия в показателях давления у мужчин и женщин наблюдались практически на всем диапазоне нагрузочного тестирования (5 мин), достигая наибольшего значения в период первых трёх минут после включения резистивного дыхания 60% P_{mmax} ($p = 0,021$).

Таким образом, реакция ДАД на стандартизированную работу инспираторных мышц у женщин менее выражена

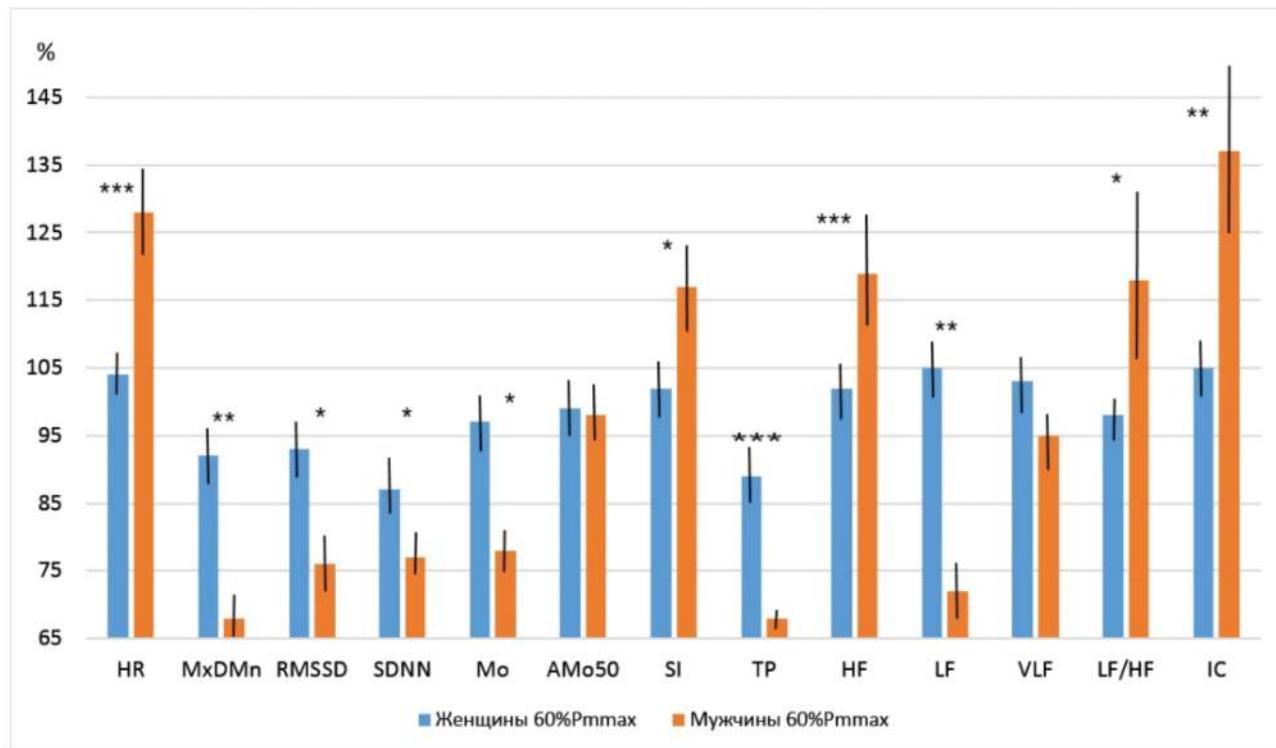


Рис. 2. Изменение показателей ВСР у испытуемых женского и мужского пола при действии дополнительного респираторного сопротивления 60% P_{mmax}. Обозначения показателей см. в тексте, статистическая значимость межгрупповых различий: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

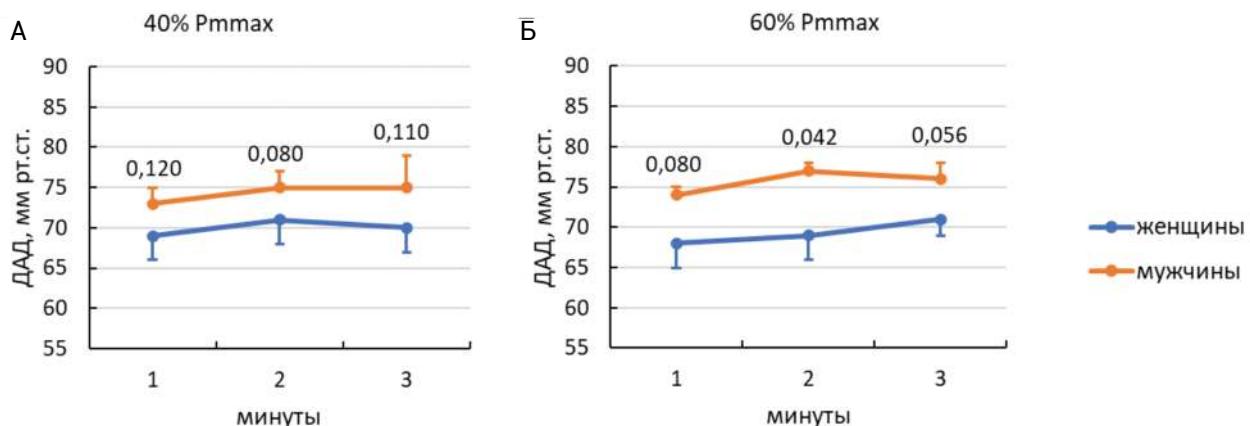


Рис. 3. Поминутная динамика ДАД на 0%Pmax у мужчин перед регистрациями с 40 (А) и 60 (Б) % Pmax. Числами обозначен уровень статистической значимости межгрупповых различий (p).

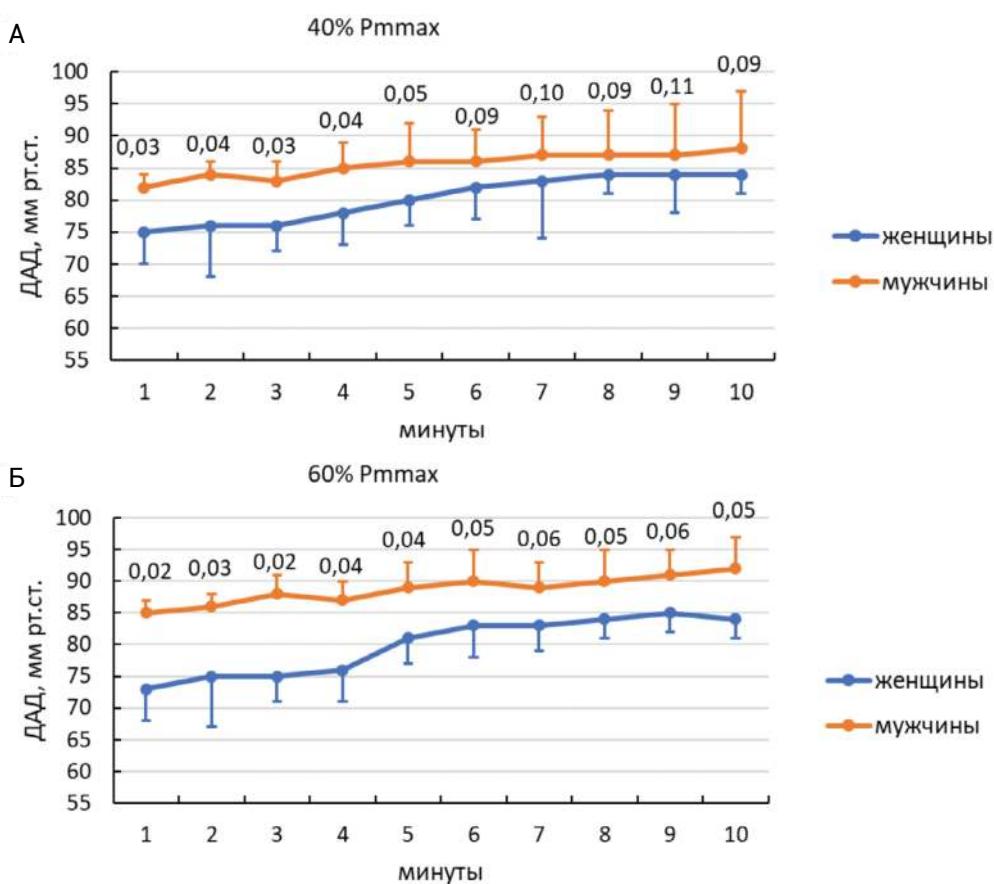


Рис. 4. Поминутная динамика ДАД в условиях статической кистевой нагрузки 20% от максимума при 10-минутном резистивном дыхании на дополнительном респираторном сопротивлении 40 (А) и 60 (Б) % Pmax. Числами обозначен уровень статистической значимости межгрупповых различий (p).

и происходит на фоне менее выраженной, чем у мужчин, симпатической реакции.

Обсуждение

Основные результаты текущего исследования двояк. Во-первых, генерация метаборефлекса на минималь-

ной градации ДРС (40% Pmax) у представителей мужского пола запускает некоторые механизмы адаптационного напряжения, характеризующегося признаками симпатической активации сердечного ритма, с уменьшением автономного и дыхательного контуров саморегуляции управления ритмом сердца. У представителей женского пола уровень симпатической активации сердечного

ритма и признаки адаптационного напряжения сердечно-го ритма на фоне резистивного дыхания 40% P_{max} были существенно меньше. Более низкие метаборефлекторные реакции симпатической нервной системы у женщин наблюдались несмотря на то, что обе группы работали с относительно равной производительностью инспираторных мышц, что обеспечивалось стандартизацией резистивных нагрузок по методу [10]. Во-вторых, в состоянии покоя (0% P_{max}) и на протяжении всей интенсивной работы инспираторных мышц (40% и 60% P_{max}) у женщин наблюдалась более низкая величина ДАД, чем у мужчин. В целом, наши результаты свидетельствуют о том, что меньшее повышение ДАД на фоне метаборефлекса дыхательных мышц, по-видимому, связано со сниженной симпатической активностью у женщин при стандартных резистивных нагрузках и физических нагрузок со стороны скелетных мышц.

С другой стороны, с увеличением ДРС необходимо учитывать возможные дополнительные эффекты увеличения центрального дыхательного привода на реакцию ВРСР, что наряду с другими физиологическими изменениями, могут увеличивать парасимпатический компонент вегетативной регуляции сердечного ритма (RMSSD). Использованный нами подход с предварительной стандартизацией резистивной нагрузки с последующим непрерывным анализом ДАД на фоне кистевой нагрузки позволяет выделить нейроваскулярные эффекты инспираторной мускулатуры [1, 2].

Ослабленная симпатическая реакция на метаборефлекс дыхательных мышц у женщин может частично быть связана с циркулирующим эстрогеном, который обладает модуляторным эффектом. Например, Ettinger S.M. с со-авт. [14] обнаружили, что реакция симпатического повышения тонуса скелетных мышц на физическую нагрузку была значительно снижена во время средней лютейновой фазы менструального цикла. Они приписали свои наблюдения нескольким механизмам, которые могут уменьшить метаборефлекторную афферентную стимуляцию [14]. К ним относятся: а) вызванные эстрогеном изменения в продукции метаболитов [14] или б) повышенное «вымывание» мышечных метаболитов из-за различий в кровотоке скелетных мышц [15]. Также было показано, что изменения в содержании эстрогена ослабляют симпатическую реакцию во время упражнений на изометрическую физическую нагрузку и окклюзию кровообращения после упражнений [16]. Что касается настоящего исследования, мы тестировали молодых женщин в фазе низкого уровня гормонов, и, тем не менее, у них сохранялась ослабленная симпатическая реакция. Влияние эстрогена на тонус сосудов скелетных мышц, вероятно многофакторное, и возможно, что в краткосрочной перспективе (т.е. в течение одного менструального цикла) наблюдаются стойкие нейроваскулярные эффекты. Дальнейшие исследования, касающиеся метаборефлекторных механизмов, необходимо провести у женщин старшего возраста, у которых в течение нескольких лет наблюдался низкий уровень эстрогена.

Заключение

Наши результаты показывают, что более низкое значение диастолического артериального давления в ответ на резистивную нагрузку инспираторных мышц в диапазоне 40–60% P_{max} у женщин происходит на фоне ослабления симпатической активности. Эти результаты получены несмотря на то, что мужчины и женщины выполняли стандартизированную нагрузку инспираторных мышц. Мы интерпретируем эти результаты как предположение о том, что рефлекторное влияние метаболитов на симпатическую стимуляцию, исходящую от дыхательной мускулатуры, у женщин ослаблено. Однако конкретные причины этих различий и их влияние на распределение кровотока требуют дальнейшего изучения.

Авторский вклад

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: разработка концепции и дизайна исследования – Бяловский Ю.Ю.; сбор данных – Бяловский Ю.Ю., Ракитина И.С.; анализ и интерпретация результатов – Бяловский Ю.Ю., Ракитина И.С.; обзор литературы, проведение статистического анализа – Абаленихина Ю.В., Щулькин А.В.; составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта – Ракитина И.С.; критический пересмотр черновика рукописи с внесением замечаний интеллектуального содержания – Бяловский Ю.Ю.

Список литературы

1. Lima T.B.W.E., Silva B.B.D.S., de Souza A.P.S., Aires D.M.F., Fagundes M.G. The effect of inspiratory muscle training on the inspiratory muscle metaboreflex: A systematic review. *Can. J. Respir. Ther.* 2025; 61: 51–59. DOI: 10.29390/001c.132324
2. Chan J.S., Mann L.M., Doherty C.J., Angus S.A., Thompson B.P., Devries M.C., Hughson R.L., Dominelli P.B. The effect of inspiratory muscle training and detraining on the respiratory metaboreflex. *Exp. Physiol.* 2023; 108(4): 636–649. DOI: 10.1113/EP090779
3. Sheel A.W., Derchak P.A., Pegelow D.F., Dempsey J.A. Threshold effects of respiratory muscle work on limb vascular resistance. *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2002; 282(5): H1732–H1738. DOI: 10.1152/ajpheart.00798.2001.
4. Shiozawa K., Kashima H., Mizuno S., Ishida K., Katayama K. Blood pressure and coeliac artery blood flow responses during increased inspiratory muscle work in healthy males. *Exp. Physiol.* 2022; 107(9): 1094–1104. DOI: 10.1113/EP090504.
5. Leahy M.G., Kipp S., Benbaruj J.M., Charkoudian N., Foster G.E., Koehle M.S., Sheel A.W. Effects of sex and ageing on the human respiratory muscle metaboreflex. *J. Physiol.* 2023; 601(3): 689–702. DOI: 10.1113/JP283838
6. Geary C.M., Welch J.F., McDonald M.R., Peters C.M., Leahy M.G., Reinhard P.A., Sheel A.W. Diaphragm fatigue and inspiratory muscle metaboreflex in men and women matched for absolute diaphragmatic work during pressure-threshold loading. *J. Physiol.* 2019; 597(18): 4797–4808. DOI: 10.1113/JP278380
7. Lee J.B., Notay K., Seed J.D., Nardone M., Omazic L.J., Millar P.J. Sex differences in muscle metaboreflex activation after static handgrip exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2021; 53(12): 2596–2604. DOI: 10.1249/MSS.0000000000002747.

8. D'Souza A.W., Hissen S.L., Manabe K., Takeda R., Washio T., Coombs G.B., Sanchez B., Fu Q., Shoemaker J.K. Age- and sex-related differences in sympathetic vascular transduction and neurohemodynamic balance in humans. *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2023; 325(4): H917– H932. DOI: 10.1152/ajpheart.00301.2023.
9. ATS Committee on Proficiency Standards for Clinical Pulmonary Function Laboratories. ATS statement: guidelines for the six-minute walk test. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2002; 166(1): 111–117. DOI: 10.1164/ajrccm.166.1.at1102. Erratum in: *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2016; 193(10): 1185. DOI: 10.1164/rccm.19310erratum
10. Александрова Н.П. Относительный вклад мышц грудной клетки и диафрагмы в работу дыхания при инспираторной резистивной нагрузке. *Российский физиологический журнал имени И.М. Сеченова.* 1993; 79(11): 64–71.
11. Бяловский Ю.Ю. Устройство для регистрации артериального давления. Авторское свидетельство СССР № 1593625; 1990.
12. Бяловский Ю.Ю. Способ непрерывной регистрации диастолического артериального давления. Авторское свидетельство СССР № 1673044; 1991.
13. Комплекс для анализа вариабельности сердечного ритма «Varicard». Рязань: ЮИМН, 2005. 45 с.
14. Ettinger S.M., Silber D.H., Collins B.G., Gray K.S., Sutliff G., Whisler S.K., McClain J.M., Smith M.B., Yang Q.X., Sinoway L.I. Influences of gender on sympathetic nerve responses to static exercise. *J. Appl. Physiol.* (1985). 1996; 80(1): 245–251. DOI: 10.1152/jappl.1996.80.1.245.
15. Thompson B.C., Fadia T., Pincivero D.M., Scheuermann B.W. Forearm blood flow responses to fatiguing isometric contractions in women and men. *Am. J. Physiol. Hear. Circ. Physiol.* 2007; 293(1): H805–H812. DOI: 10.1152/ajpheart.01136.2006
16. Wenner M.M., Greaney J.L., Matthews E.L., McGinty S., Kaur J., Vongpatanasin W., Fadel P.J. Influence of age and estradiol on sympathetic nerve activity responses to exercise in women. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 2022; 54(3): 408–416. DOI: 10.1249/MSS.0000000000002823
4. Shiozawa K., Kashima H., Mizuno S., Ishida K., Katayama K. Blood pressure and coeliac artery blood flow responses during increased inspiratory muscle work in healthy males. *Exp. Physiol.* 2022; 107(9): 1094–1104. DOI: 10.1113/EP090504.
5. Leahy M.G., Kipp S., Benbaruj J.M., Charkoudian N., Foster G.E., Koeble M.S., Sheel A.W. Effects of sex and ageing on the human respiratory muscle metaboreflex. *J. Physiol.* 2023; 601(3): 689–702. DOI: 10.1113/JP283838
6. Garry C.M., Welch J.F., McDonald M.R., Peters C.M., Leahy M.G., Reinhard P.A., Sheel A.W. Diaphragm fatigue and inspiratory muscle metaboreflex in men and women matched for absolute diaphragmatic work during pressure-threshold loading. *J. Physiol.* 2019; 597(18): 4797–4808. DOI: 10.1113/JP278380
7. Lee J.B., Notay K., Seed J.D., Nardone M., Omazic L.J., Millar P.J. Sex differences in muscle metaboreflex activation after static handgrip exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2021; 53(12): 2596–2604. DOI: 10.1249/MSS.0000000000002747.
8. D'Souza A.W., Hissen S.L., Manabe K., Takeda R., Washio T., Coombs G.B., Sanchez B., Fu Q., Shoemaker J.K. Age- and sex-related differences in sympathetic vascular transduction and neurohemodynamic balance in humans. *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2023; 325(4): H917– H932. DOI: 10.1152/ajpheart.00301.2023.
9. ATS Committee on Proficiency Standards for Clinical Pulmonary Function Laboratories. ATS statement: guidelines for the six-minute walk test. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2002; 166(1): 111–117. DOI: 10.1164/ajrccm.166.1.at1102. Erratum in: *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2016; 193(10): 1185. DOI: 10.1164/rccm.19310erratum
10. Aleksandrova N.P. [Relative contribution of the chest muscles and diaphragm to the work of breathing during inspiratory resistive load]. *Rossiskiy fiziologicheskiy zhurnal imeni I.M. Sechenova [I.M. Sechenov Russian Physiological Journal].* 1993; 79(11): 64–71. (in Russian)
11. Бяловский Ю.Ю. [Device for recording arterial pressure]. USSR Author's Certificate No. 1593625; 1990. (in Russian).
12. Бяловский Ю.Ю. [Method of continuous recording of diastolic arterial pressure]. USSR Author's Certificate No. 1673044; 1991. (in Russian).
13. Complex for analysis of heart rate variability “Varicard”. Ryazan: YUMN, 2018. 45 p. (in Russian).
14. Ettinger S.M., Silber D.H., Collins B.G., Gray K.S., Sutliff G., Whisler S.K., McClain J.M., Smith M.B., Yang Q.X., Sinoway L.I. Influences of gender on sympathetic nerve responses to static exercise. *J. Appl. Physiol.* (1985). 1996; 80(1): 245–251. DOI: 10.1152/jappl.1996.80.1.245.
15. Thompson B.C., Fadia T., Pincivero D.M., Scheuermann B.W. Forearm blood flow responses to fatiguing isometric contractions in women and men. *Am. J. Physiol. Hear. Circ. Physiol.* 2007; 293(1): H805–H812. DOI: 10.1152/ajpheart.01136.2006
16. Wenner M.M., Greaney J.L., Matthews E.L., McGinty S., Kaur J., Vongpatanasin W., Fadel P.J. Influence of age and estradiol on sympathetic nerve activity responses to exercise in women. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 2022; 54(3): 408–416. DOI: 10.1249/MSS.0000000000002823

References

1. Lima T.B.W.E., Silva B.B.D.S., de Souza A.P.S., Aires D.M.F., Fagundes M.G. The effect of inspiratory muscle training on the inspiratory muscle metaboreflex: A systematic review. *Can. J. Respir. Ther.* 2025; 61: 51–59. DOI: 10.29390/001c.132324
2. Chan J.S., Mann L.M., Doherty C.J., Angus S.A., Thompson B.P., Devries M.C., Hughson R.L., Dominelli P.B. The effect of inspiratory muscle training and detraining on the respiratory metaboreflex. *Exp. Physiol.* 2023; 108(4): 636–649. DOI: 10.1113/EP090779
3. Sheel A.W., Derchak P.A., Pegelow D.F., Dempsey J.A. Threshold effects of respiratory muscle work on limb vascular resistance. *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2002; 282(5): H1732–H1738. DOI: 10.1152/ajpheart.00798.2001.
1. Lima T.B.W.E., Silva B.B.D.S., de Souza A.P.S., Aires D.M.F., Fagundes M.G. The effect of inspiratory muscle training on the inspiratory muscle metaboreflex: A systematic review. *Can. J. Respir. Ther.* 2025; 61: 51–59. DOI: 10.29390/001c.132324
2. Chan J.S., Mann L.M., Doherty C.J., Angus S.A., Thompson B.P., Devries M.C., Hughson R.L., Dominelli P.B. The effect of inspiratory muscle training and detraining on the respiratory metaboreflex. *Exp. Physiol.* 2023; 108(4): 636–649. DOI: 10.1113/EP090779
3. Sheel A.W., Derchak P.A., Pegelow D.F., Dempsey J.A. Threshold effects of respiratory muscle work on limb vascular resistance. *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2002; 282(5): H1732–H1738. DOI: 10.1152/ajpheart.00798.2001.
14. Ettinger S.M., Silber D.H., Collins B.G., Gray K.S., Sutliff G., Whisler S.K., McClain J.M., Smith M.B., Yang Q.X., Sinoway L.I. Influences of gender on sympathetic nerve responses to static exercise. *J. Appl. Physiol.* (1985). 1996; 80(1): 245–251. DOI: 10.1152/jappl.1996.80.1.245.
15. Thompson B.C., Fadia T., Pincivero D.M., Scheuermann B.W. Forearm blood flow responses to fatiguing isometric contractions in women and men. *Am. J. Physiol. Hear. Circ. Physiol.* 2007; 293(1): H805–H812. DOI: 10.1152/ajpheart.01136.2006
16. Wenner M.M., Greaney J.L., Matthews E.L., McGinty S., Kaur J., Vongpatanasin W., Fadel P.J. Influence of age and estradiol on sympathetic nerve activity responses to exercise in women. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 2022; 54(3): 408–416. DOI: 10.1249/MSS.0000000000002823

Сведения об авторах:

Бяловский Юрий Юльевич — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой патофизиологии Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; <https://orcid.org/0000-0002-6769-8277>

Ракитина Ирина Сергеевна — кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры патофизиологии Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; <https://orcid.org/0000-0002-9406-1765>

Абаленихина Юлия Владимировна — доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры биохимии Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; <https://orcid.org/0000-0003-0427-0967>

Щулькин Алексей Владимирович — доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры фармакологии Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; <https://orcid.org/0000-0003-1688-0017>