

А. Я. БЕДРОВ¹, К. А. БЕЛОВА¹, А. А. МОИСЕЕВ¹,
А. В. БАЙКОВА¹, А. Н. КРУТИКОВ², О. С. ГАНЕНКО²,
М. В. НАЗИМОВА², Г. Г. ХУБУЛАВА¹

Значение транскутанной оксиметрии при пробе с физической нагрузкой в оценке выраженности хронической ишемии нижних конечностей

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации 197341, Россия, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2
E-mail: ksens96@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.11.2025 г.; принята к печати 30.01.2026 г.

Резюме

Введение. Выраженность ишемии нижних конечностей может быть определена на основании уровня лодыжечно-плечевого индекса (ЛПИ), что является неинвазивным и доступным способом диагностики. Одним из способов, позволяющих оценить кровоснабжение нижних конечностей не только в покое, но и при физической нагрузке, является транскутанная оксиметрия (ТКО), что обуславливает интерес к изучению возможности определения выраженности хронической ишемии нижних конечностей с использованием этого метода. **Цель.** Определить корреляцию между показателями чрескожного напряжения кислорода (tcpO_2) на стопах при пробе с физической нагрузкой и уровнем ЛПИ в покое у больных с окклюзионно-стенотическим поражением артерий нижних конечностей. **Материалы и методы.** В ретроспективное исследование включены 34 пациента (23 мужчины и 11 женщин, средний возраст $69 \pm 4,9$ лет) с окклюзионно-стенотическим поражением аорто-подвздошного сегмента и артерий нижних конечностей. У всех больных была диагностирована хроническая ишемия IIb стадии по Фонтейну – Покровскому. Пациентам были выполнены такие исследования как: мультиспиральная компьютерно-томографическая ангиография и/или катетерная ангиография брюшной аорты и артерий нижних конечностей, ТКО стоп при пробе с физической нагрузкой, вычисление ЛПИ. Критериями исключения являлись: наличие окклюзионно-стенотического поражения артерий голени, препятствующего измерению лодыжечного давления; острая или хроническая ишемия, угрожающая потерей нижней конечности; наличие сопутствующих заболеваний, ограничивающих проведение тредмил-теста. Оценивали корреляцию между уровнем ЛПИ и минимальными значениями измеренного tcpO_2 на стопах в состоянии покоя сидя и стоя, во время и после ходьбы на беговой дорожке, а также отношениями их значений в разные периоды измерения. Проведен анализ предсказательной способности показателей ТКО в отношении уровня ЛПИ. **Результаты.** Не установлено статистически значимой корреляции между абсолютными значениями tcpO_2 на стопах и ЛПИ. Максимальный статистически значимый ($p=0,001$) коэффициент корреляции Спирмена ($\rho=0,48$) оказался между ЛПИ и отношением tcpO_2 на стопах в восстановительном периоде после физической нагрузки к исходному значению этого показателя, измеренного в положении стоя до нагрузки. При уровне указанного индекса менее 0,84 чувствительность и специфичность в отношении снижения ЛПИ менее 0,7 составляет 70 % и 88 %, соответственно ($p<0,001$). **Заключение.** Отношение показателей tcpO_2 на стопах в восстановительном периоде после физической нагрузки к аналогичному показателю, измеренному в положении стоя до нагрузки, достоверно коррелирует со значением ЛПИ, а уровень указанного отношения менее 0,84 может свидетельствовать о субкомпенсированной ишемии нижних конечностей.

Ключевые слова: транскутанная оксиметрия, тредмил-тест, лодыжечно-плечевой индекс, хроническая ишемия нижних конечностей, перемежающаяся хромота

Для цитирования: Бедров А. Я., Белова К. А., Моисеев А. А., Байкова А. В., Крутиков А. Н., Ганенко О. С., Назимова М. В., Хубулава Г. Г. Значение транскутанной оксиметрии при пробе с физической нагрузкой в оценке выраженности хронической ишемии нижних конечностей. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2026;25(1):37–44. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2026-25-1-37-44>.

Alexander Ya. BEDROV¹, Ksenia A. BELOVA^{1*},
 Alexey A. MOISEEV¹, Anna V. BAYKOVA¹,
 Alexander N. KRUTIKOV², Olga S. GANENKO²,
 Marina V. NAZIMOVA², Gennadiy G. KHUBULAVA¹

Value of Transcutaneous Oximetry during Exercise Test in Assessing the Severity of Chronic Lower Limb Ischemia

¹Pavlov University

6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg, Russia, 197022

²Almazov National Medical Research Centre

2, Akkuratova str., Saint Petersburg, Russia, 197341

E-mail: ksens96@mail.ru

Received 12.11.25; accepted 30.01.26

Summary

Introduction. The severity of lower extremity ischemia can be determined based on the ankle-brachial index (ABI), a noninvasive and widely available diagnostic method. Transcutaneous oximetry (tcpO₂) is one of the methods for assessing lower extremity blood flow not only at rest but also during exercise. This has prompted interest in studying the feasibility of assessing the severity of chronic lower extremity ischemia using this method. **Objective.** To determine the correlation between transcutaneous oxygen tension (tcpO₂) values on the feet during exercise testing and the ABI value at rest in patients with occlusive-stenotic lesions of the lower extremity arteries. **Materials and Methods.** This retrospective study included 34 patients (23 men and 11 women, mean age 69±4.9 years) with occlusive-stenotic lesions of the aortoiliac segment and lower extremity arteries. All patients were diagnosed with chronic ischemia stage IIb according to Fontaine-Pokrovsky. The patients underwent the following examinations: multislice computed tomography angiography and/or catheter angiography of the abdominal aorta and lower extremity arteries, tcpO₂ of the feet during exercise testing, and ABI calculation. Exclusion criteria were occlusive-stenotic lesions of the lower extremity arteries preventing ankle pressure measurement, acute or chronic limb-threatening ischemia, and comorbidities limiting treadmill testing. We assessed the correlation between the ABI level and minimum foot tcpO₂ values at rest, measured sitting, standing, during and after treadmill walking, as well as their ratios at different measurement periods. The predictive ability of tcpO₂ indicators in relation to the ABI level was also analyzed. **Results.** No statistically significant correlation was found between absolute foot tcpO₂ values and ABI. The highest statistically significant (p=0.001) Spearman correlation coefficient (rho=0.48) was found between ABI and the ratio of foot tcpO₂ during the recovery period after exercise to the baseline value measured in a standing position before exercise. At a ratio below 0.84, the sensitivity and specificity for a decrease in ABI below 0.7 were 70% and 88%, respectively (p<0.001). **Conclusion.** The ratio of foot tcpO₂ values during the recovery period after exercise to the same value measured in a standing position before exercise significantly correlates with the ABI value, and a value of this ratio below 0.84 may indicate subcompensated lower extremity ischemia.

Keywords: transcutaneous oximetry, treadmill test, ankle-brachial index, chronic lower extremity ischemia, intermittent claudication

For citation: Bedrov A. Ya., Belova K. A., Moiseev A. A., Baykova A. V., Krutikov A. N., Ganenko O. S., Nazimova M. V., Khubulava G. G. Value of Transcutaneous Oximetry during Exercise Test in Assessing the Severity of Chronic Lower Limb Ischemia. *Regional Hemodynamics and Microcirculation*. 2026;25(1):37–44. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2026-25-1-37-44>.

Введение

Во всем мире отмечается неуклонный рост числа больных с атеросклеротическим поражением магистральных артерий нижних конечностей [1]. Выраженность ишемии последних может быть определена на основании уровня лодыжечно-плечевого индекса (ЛПИ), что является неинвазивным и доступным способом диагностики [2]. В ряде случаев, например при окклюзионно-стенотическом поражении артерий голени или их медиакальцинозе, измерение лодыжечного давления может представлять большие трудности, а ЛПИ оказаться неинформативным [3]. В литературе описаны такие методы оценки кровоснабжения

нижних конечностей, как определение ЛПИ при пробе с физической нагрузкой, ближняя инфракрасная спектроскопия, инфракрасная термография, однофотонная эмиссионная томография др. [4–7]. Одним из способов, позволяющих оценить кровоснабжение нижних конечностей не только в покое, но и при физической нагрузке является транскутанная оксиметрия (ТКО), что обуславливает интерес к изучению возможности определения выраженности хронической ишемии нижних конечностей с использованием этого метода.

Цель исследования – определить корреляцию между показателями чрескожного напряжения кис-

лорода (tcpO_2) на стопах при пробе с физической нагрузкой и значением лодыжечно-плечевого индекса (ЛПИ) в покое у больных с окклюзионно-стенотическим поражением артерий нижних конечностей.

Материалы и методы исследования

В исследование включены 34 пациента (23 мужчины и 11 женщин), в период с 2022 по 2025 год проходивших обследование и лечение в отделении сосудистой хирургии НИИ хирургии и неотложной медицины ПСПбГМУ им. И. П. Павлова в связи с наличием клинической картины перемежающейся хромоты. У всех больных была диагностирована хроническая ишемия IIb стадии по Фонтейну – Покровскому. Основной жалобой пациентов была боль по типу низкой перемежающейся хромоты с дистанцией безболевого ходьбы менее 200 метров. Средний возраст составил $69 \pm 4,9$ лет. Критериями исключения из исследования являлись: наличие у пациента окклюзионно-стенотического поражения артерий голени, препятствующего измерению лодыжечного давления; острая или хроническая ишемия, угрожающая потерей нижней конечности; наличие сопутствующих заболеваний и травм, ограничивающих проведение тредмил-теста. Всем пациентам проводилось ультразвуковое дуплексное сканирование (УЗДС) артерий обеих нижних конечностей ($n=68$), а также измерение лодыжечного и плечевого давления в покое с использованием ультразвуковой диагностической системы «Vivid 7» (General Electric, США) с последующим определением ЛПИ. При возможности измерения лодыжечного давления на передней и задней большеберцовых артериях для вычисления уровня ЛПИ использовалась максимальная из двух величин.

Для оценки проходимости аорто-подвздошного сегмента и артерий нижних конечностей выполнялась мультиспиральная компьютерно-томографическая ангиография (МСКТ-АГ) и/или катетерная ангиография (АГ) брюшной аорты и артерий нижних конечностей. Исследование выполнялось при отсутствии противопоказаний для внутривенного введения йодсодержащих контрастных препаратов, в качестве которого использовали препарат «Ультравист» 370 мг йода/мл (Bayer Schering Pharma AG, Германия).

МСКТ-АГ выполнялась на 64-срезовом мультиспиральном компьютерном томографе General Electric Optima CT660 (GE Healthcare, США). МСКТ-АГ проводили от уровня диафрагмы до стоп в спиральном режиме с толщиной среза 1,25 мм и скоростью сканирования 39,37 мм за 1 оборот рентгеновской трубки. Сила тока на трубке в момент исследования составляла 350 мА, напряжение – 80 кВ. Введение контрастного препарата в объеме 60–80 мл осуществляли внутривенно при помощи автоматического инжектора Dual Shot Alpha (Nemoto Kyorindo, Япония) со скоростью 3,3–3,5 мл/с с последующим однократным сканированием и получением артериальной фазы контрастного усиления.

Ангиография брюшной аорты и артерий нижних конечностей выполнялась по методике Сельдингера трансфеморальным, трансбрахиальным или трансрадиальным доступом на ангиографическом комплексе

«Innova 3100» (General Electric, США). Гемодинамически значимым поражением артерии считалось наличие стеноза более 50 %, измеренного по диаметру, или ее окклюзия.

Проба с физической нагрузкой проводилась на беговой дорожке с электроприводом согласно протоколу Гарднера [8]. В течение первой минуты ходьбы при уклоне 10 % скорость постепенно увеличивалась до 3,2 км/ч и далее сохранялась на этом уровне до прекращения нагрузки. Противопоказаниями к проведению тестирования на беговой дорожке являлись: хроническая сердечно-сосудистая недостаточность (стенокардия высокого функционального класса, тяжелая аритмия), заболевания опорно-двигательного аппарата (коксартроз, гонартроз, перенесенные травмы), последствия перенесенного острого нарушения мозгового кровообращения с выраженным неврологическим дефицитом, дегенеративно-дистрофические изменения позвоночника. При появлении или усилении боли по типу перемежающейся хромоты, препятствующей продолжению ходьбы, пробу с физической нагрузкой прекращали по требованию пациента.

Для проведения ТКО использовался аппарат TCM 400 (Radiometer, Дания). Все процедуры, включая измерение tcpO_2 , калибровку прибора, замену мембран датчиков, проводились согласно рекомендациям производителя. Температура в помещении, где проводилось исследование, составляла 21–23 °С. Пациентам запрещалось курить, пить кофе или чай за 30 минут до исследования. Исследование проводилось после 15-минутного отдыха пациента. После предварительной обработки кожи спиртом на тыльную поверхность стопы устанавливалось фиксирующее кольцо, которое заполнялось раствором электролита (2–3 капли), затем в него устанавливался датчик. Измерение tcpO_2 одновременно проводилось на двух стопах. Регистрация tcpO_2 (в мм рт. ст.) производилась каждые 20 секунд в положении сидя, затем стоя, во время ходьбы и после прекращения нагрузки в положении стоя. Для статистического анализа использовались минимальные значения tcpO_2 для каждого периода измерений.

Статистический анализ. Статистический анализ полученных данных выполнен при помощи компьютерной программы MedCalc Ver. 20.010 (Бельгия) с использованием методов параметрической и непараметрической статистики. Для представления количественных данных использовались среднее арифметическое (M) и ошибка среднего значения (m) для показателей, имеющих нормальное распределение. Данные, распределение которых отличается от нормального, представлены в виде медианы, минимального и максимального значения, верхнего и нижнего квартиля. Проверка на нормальность распределения проводилась с использованием критериев Колмогорова – Смирнова и Шапиро – Уилка. Корреляционный анализ проводился с использованием непараметрического коэффициента ранговой корреляции (ρ) Спирмена. Качественные данные представлены в виде абсолютного числа и процента. Уровень статистической значимости различий принят при $p < 0,05$. Для оценки предсказательной способности положительного и отрицательного результатов

Характеристика обследованных больных (n=34)

Table 1

Clinical characteristics of the studied patients (n=34)

Клиническая характеристика	Число больных	
	Абс.	%
Артериальная гипертензия 3–4 ст., n	33	97
Ишемическая болезнь сердца, n	20	58,8
Инфаркт миокарда в анамнезе, n	2	5,8
Реваскуляризация миокарда в анамнезе, n	10	29,4
Гемодинамически значимое поражение прецеребральных артерий, n	14	41,2
Реваскуляризация головного мозга в анамнезе, n	10	29,4
Острое нарушение мозгового кровообращения в анамнезе, n	10	29,4
Сахарный диабет, n	6	17,6
Хроническая обструктивная болезнь легких, n	4	11,8
Хроническая болезнь почек 4–5 ст., n	2	5,9

использованы таблицы сопряженности и метод построения ROC-кривой с последующим определением площади под ней, а также определением порогового значения исследуемого показателя, соответствующего максимальному значению индекса Юдена.

Все пациенты, участвовавшие в исследовании дали на это письменное добровольное информированное согласие. Исследование выполнялось в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (2013).

Результаты исследования и их обсуждение

Среди пациентов, включенных в исследование, преобладали мужчины – 23 (67,6 %). У большинства больных сопутствующая патология была представлена артериальной гипертензией – 33 (97 %), ишемической болезнью сердца – 20 (58,8 %) и окклюзионно-стенотическим поражением прецеребральных артерий – 14 (41,2 %), что указывает на наличие мультифокального атеросклероза. У шести пациентов (17,6 %) имел место сахарный диабет 2-го типа без трофических расстройств, малых ампутаций нижних конечностей в анамнезе. У двух пациентов (5,9 %) была выявлена хроническая болезнь почек 4 стадии. Клинических проявлений выраженной нейропатии нижних конечностей, а также признаков медиакальциноза артерий голени по данным УЗДС у этих групп больных не определялось. Клиническая характеристика обследованных больных представлена в табл. 1.

Среди исследованных больных не было случаев окклюзионно-стенотического поражения брюшной аорты. У 2/3 пациентов наблюдались гемодинамически значимые изменения артериального бедренно-подколенного сегмента, а у 1/3 – подвздошных артерий. Характеристика поражения подвздошных артерий и артерий нижних конечностей приведена в табл. 2.

Не установлено статистически значимой корреляционной связи между абсолютными значениями $tcPO_2$ на стопах в разные периоды измерений и ЛПИ, однако вы-

явлена корреляция между ЛПИ и отношением $tcPO_2$ на стопах в восстановительном периоде после физической нагрузки к аналогичному показателю, измеренному в положении стоя до нагрузки. При этом коэффициент rho Спирмена составил 0,48, что соответствует положительной корреляционной связи. График корреляции уровня ЛПИ и указанного отношения минимального уровня $tcPO_2$ стоп представлен на рис. 1.

При анализе предсказательной способности $tcPO_2$ на стопах при пробе с физической нагрузкой в отношении уровня ЛПИ менее 0,7 установлено, что при уровне отношения $tcPO_2$ на стопах в восстановительном периоде после физической нагрузки к этому показателю, измеренному в положении стоя до нагрузки, менее или равному 0,84 чувствительность и специфичность составляет 70 % и 88 %, соответственно ($p < 0,001$). Результаты статистического анализа предсказательной способности указанного отношения минимального уровня $tcPO_2$ стоп в отношении выраженности хронической ишемии нижних конечностей представлены на рис. 2.

Современные стандарты обследования пациентов с хронической ишемией нижних конечностей включают в себя комплексную клиническую оценку и использование таких методов диагностики, как МСКТ-АГ, АГ, магнитно-резонансная ангиография и УЗДС, позволяющих определять локализацию окклюзионно-стенотических изменений, в то время как оценить выраженность ишемических расстройств нижних конечностей позволяет вычисление ЛПИ и пальце-плечевого индекса (ППИ). Наиболее доступным и неинвазивным методом является УЗДС с измерением плечевого и лодыжечного давления с последующим вычислением ЛПИ [2]. Однако при наличии выраженного окклюзионно-стенотического поражения артерий голени измерение лодыжечного давления не представляется возможным. Кроме того, согласно литературным данным, медиакальциноз, имеющийся у пациентов с сахарным диабетом или терминальной

Структура поражения артерий у обследованных больных (n=34)

Table 2

Distribution of arterial lesions in the studied patients (n=34)

Локализация поражения	Одностороннее		Двустороннее		Всего	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Общая подвздошная артерия	8	23,5	–	–	8	23,5
Внутренняя подвздошная артерия	11	32,3	5	14,7	16	47
Наружная подвздошная артерия	8	23,5	2	5,9	10	29,4
Общая бедренная артерия	5	14,7	1	2,9	6	18,6
Глубокая артерия бедра	10	29,4	3	8,8	13	38,2
Поверхностная бедренная артерия	13	38,2	16	47	29	85,2
Подколенная артерия	6	18,6	7	20,6	13	38,2
Тибιοперонеальный ствол	5	14,7	5	14,7	10	29,4
Передняя большеберцовая артерия	10	29,4	12	35,3	22	64,7
Задняя большеберцовая артерия	18	52,9	4	11,8	22	64,7
Малоберцовая артерия	5	14,7	3	8,8	8	23,5

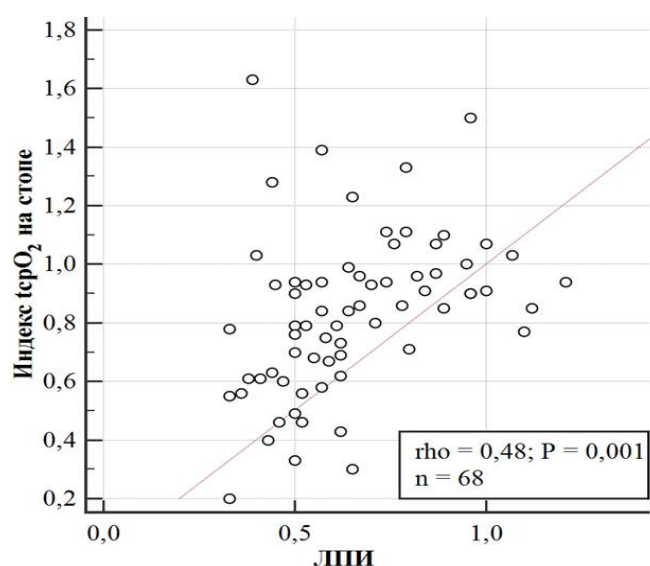


Рис. 1. Диаграмма рассеивания между уровнем ЛПИ и отношением минимального значения tcpO_2 на стопе в положении стоя в восстановительном периоде после физической нагрузки к аналогичному показателю, измеренному в покое до нагрузки в положении стоя (n=68)

Fig. 1. Scatter plot showing the correlation between ABI and the ratio of the minimum foot tcpO_2 value in a standing position during the recovery period after physical exercise to the same value measured at rest in a standing position before exercise (n=68)

стадией хронической болезни почек, может также затруднять измерение лодыжечного давления [9]. Это обусловлено высокой ригидностью стенки берцовых артерий, отсутствием их адекватной компрессии в ответ на раздувание манжеты тонометра и завышением показателей лодыжечного давления. Согласно Национальным клиническим рекомендациям от 2024 года, посвященным хронической ишемии нижних конечностей с клинической картиной перемежающейся хромоты, при несжимаемых артериях голени и зна-

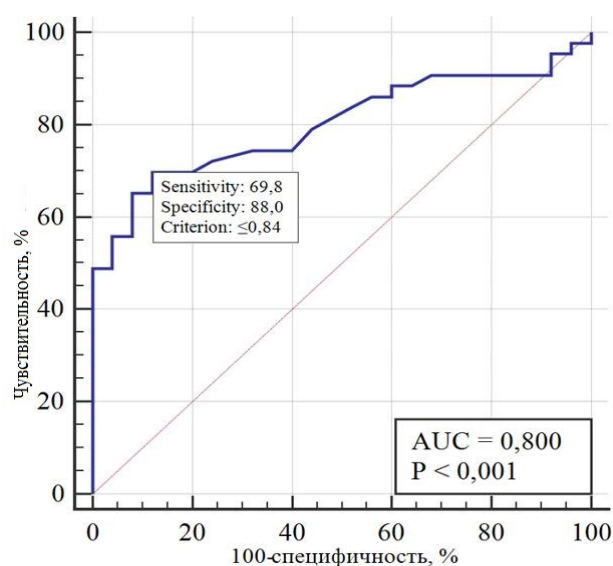


Рис. 2. Предсказательная способность отношения минимального значения tcpO_2 на стопе в восстановительном периоде после ходьбы к этому показателю, измеренному до нагрузки в положении стоя, в отношении выраженности ишемии нижних конечностей (n=68)

Fig. 2. ROC curve showing the predictive ability of the ratio of the minimum foot tcpO_2 value in a standing position during the recovery period after walking to the same indicator measured before exercise in a standing position in relation to the severity of lower extremity ischemia (n=68)

чении ЛПИ более или равном 1,4 применяется оценка ППИ [10]. Однако, по данным некоторых авторов, у пациентов с тяжелой периферической нейропатией, обусловленной вышеуказанной патологией, снижение эластических свойств и ригидность стенки могут распространяться на пальцевые артерии, что приводит к недостоверным результатам ППИ [11]. Таким образом, проблема определения выраженности хронической ишемии нижних конечностей у такой категории больных остается актуальной.

Транскутанная оксиметрия является способом оценки микрогемодинамики, основанным на полярографическом методе [12]. Измерение напряжения кислорода осуществляется с помощью электрода Кларка, установленного на кожу и нагревающего ее, что вызывает при этом локальную гиперемию, которая приводит к местному усилению кровообращения и интенсифицирует чрескожную диффузию кислорода. Известно, что измеряемое таким электродом $tc\text{rO}_2$ коррелирует с напряжением кислорода артериальной крови и количественно характеризует кожный кровоток, а стандартной точкой для измерения $tc\text{rO}_2$ с установленным порогом ишемии является тыл стопы [13, 14]. Именно значение $tc\text{rO}_2$, определяющее локальную артериальную микроперфузию исследуемой области, позволяет объективно оценить резервы микроциркуляторного русла и тканевой метаболизм.

Боль в нижних конечностях, возникающая при физической нагрузке и купирующаяся при ее прекращении, является основным симптомом перемежающейся хромоты, обусловленной окклюзионно-стенозическим поражением аорто-подвздошного сегмента и артерий нижних конечностей [15]. Это явление обусловлено стимуляцией ноцицепторов тканевым ацидозом, вызванным накоплением лактата, который, в свою очередь, аккумулируется из-за несоответствия между потребностью и доставкой кислорода к работающим мышцам [16]. В исследовании во время проведения тредмил-теста мы наблюдали разнонаправленную динамику показателей $tc\text{rO}_2$. Так как регистрируемое $tc\text{rO}_2$ является результирующей величиной между доставкой и потреблением O_2 тканями, по мере увеличения потребления O_2 значение $tc\text{rO}_2$, вероятно, должно постепенно уменьшаться. Однако при достаточном перфузионном давлении в нижних конечностях, которое в свою очередь зависит от системного артериального давления, значение $tc\text{rO}_2$ у ряда больных может оставаться на прежнем уровне, а в некоторых случаях даже увеличиваться (например, при избыточно гипертензивной реакции во время физической нагрузки). Возможно, именно это объясняет причину отсутствия корреляции между абсолютными значениями $tc\text{rO}_2$ в разные периоды измерений и ЛПИ, а также нормативов $tc\text{rO}_2$ при пробе с физической нагрузкой.

По данным современной литературы, определение $tc\text{rO}_2$ на стопах достаточно широко используется в мировой практике для оценки прогноза заживления язвенно-некротических поражений при критической ишемии нижних конечностей, а также жизнеспособности тканей и уровня ампутации нижней конечности [17, 18]. Кроме того, в некоторых публикациях описана функциональная проба на беговой дорожке с регистрацией показателей ТКО [19–21]. По мнению некоторых авторов, измерение $tc\text{rO}_2$ во время и после физической нагрузки объективно демонстрируют компенсаторные возможности периферического русла. Так, снижение $tc\text{rO}_2$ при ходьбе со скоростью 1–4 км/час на 20 мм рт. ст. свидетельствует о наличии окклюзионного процесса в артериях нижних конечностей [22]. Однако крайне мало литературных

данных об использовании этого метода в оценке выраженности и объективизации ишемии нижних конечностей у пациентов с клинической картиной перемежающейся хромоты.

По данным ретроспективных исследований, значение ЛПИ менее или равное 0,9 в отношении диагностического теста для выявления гемодинамически значимых изменений в артериях конечности обладает чувствительностью и специфичностью 75 % и 86 %, соответственно [2]. Однако такие пациенты могут длительно оставаться асимптомными. Для статистического анализа нами был выбран пороговый уровень ЛПИ менее 0,7, что, по данным некоторых источников, свидетельствует о субкомпенсированном кровообращении в нижних конечностях [23, 24]. В случаях, когда уровень ЛПИ достоверно оценить невозможно, допустимо использование метода ТКО, при котором показатели регистрируются непосредственно во время появления боли и в восстановительном периоде.

Ограничения. Проведенное исследование носило одноцентровой ретроспективный характер, в связи с чем исследованная группа пациентов относительно небольшая, что могло повлиять на результаты статистического анализа. В проведенном исследовании технические возможности аппарата для ТКО были ограничены только двумя каналами получения информации от электродов. Кроме того, результаты измерения $tc\text{rO}_2$ определяются рядом факторов (температура в помещении при проведении исследования, температура кожи, наличие сопутствующей патологии, потенциально ассоциированной с гипоксией, например анемия и другие), которые мы постарались нивелировать.

Заключение

Отношение показателей $tc\text{rO}_2$ на стопах в восстановительном периоде после физической нагрузки к этому показателю, измеренному в положении стоя до нагрузки, статистически значимо коррелирует со значением ЛПИ, а уровень указанного отношения менее 0,84 может свидетельствовать о субкомпенсированной ишемии нижних конечностей.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Литература / References

1. Pabon M, Cheng S, Altin SE, et al. Sex differences in peripheral artery disease. *Circulation Research*. 2022;130(4):496–51. Doi: 10.1161/CIRCRESAHA.121.320702.
2. Xu D., et al. Diagnostic value of ankle-brachial index in peripheral arterial disease: a meta-analysis. *Canadian Journal of Cardiology*. 2013;29(4):492–498. Doi: 10.1016/j.cjca.2012.06.014.
3. Mills JL. Lower limb ischaemia in patients with diabetic foot ulcers and gangrene: recognition, anatomic patterns and revascularization strategies. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*. 2016;32(1):239–245. Doi: 10.1002/dmrr.2753.
4. Chou T-H, Janse S, Sinusas AJ, Stacy MR. SPECT/CT imaging of lower extremity perfusion reserve: A non-invasive

- correlate to exercise tolerance and cardiovascular fitness in patients undergoing clinically indicated myocardial perfusion imaging. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2020;27(6):1923–1933. Doi: 10.1007/s12350-019-02019-w.
5. Joseph S, Munshi B, Agarini R, et al. Near infrared spectroscopy in peripheral artery disease and the diabetic foot: A systematic review. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*. 2022;38(7):e3571. Doi: 10.1002/dmrr.3571.
6. Tehan PE, Barwick AL, Sebastian M, Chuter VH. Diagnostic accuracy of the postexercise ankle-brachial index for detecting peripheral artery disease in suspected claudicants with and without diabetes. *Vascular Medicine*. 2018 Apr;23(2):116–125. Doi: 10.1177/1358863X17751259.
7. Zenunaj G, Lamberti N, Manfredini F, et al. Infrared thermography as a diagnostic tool for the assessment of patients with symptomatic peripheral arterial disease undergoing infrapopliteal endovascular revascularisations. *Diagnostics*. 2021;11(9):1701. Doi: 10.3390/diagnostics11091701.
8. Teijink J. Agreements and discrepancies between the estimated walking distance, non-graded and graded treadmill testing and outside walking in patients with intermittent claudication. *Annals of Vascular Surgery*. 2015;29(6):1218–1224. Doi: 10.1016/J.AVSG.2015.02.011.
9. Aboyns V, Criqui MH, Abraham P, et al. Measurement and interpretation of the ankle-brachial index. *Circulation*. 2012 Dec 11;126(24):2890–909. Doi: 10.1161/cir.0b013e318276fbc.
10. Normahani P, Mustafa C, Shalhoub J, et al. A systematic review and meta-analysis of the diagnostic accuracy of point-of-care tests used to establish the presence of peripheral arterial disease in people with diabetes. *Journal of Vascular Surgery*. 2021;73(5):1811–1820. Doi: 10.1016/j.jvs.2020.11.030.
11. Бондаренко О. Н., Любова Н. Л., Галстян Г. Р., Дедов И. И. Транскутанная оксиметрия в динамическом наблюдении за пациентами с сахарным диабетом и критической ишемией нижних конечностей // Сахарный диабет. 2013. Т. 1. С. 33–42. [Bondarenko ON, Ayubova NL, Galstyan GR, Dedov II. Transcutaneous oximetry in dynamic monitoring of patients with diabetes mellitus and critical lower limb ischemia. *Diabetes mellitus*. 2013;1:33–42. (In Russ.)]. Doi: 10.14341/2072-0351-3594.
12. Severinghaus JW. Monitoring oxygenation. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. 2011;25:155–161. Doi: 10.1007/s10877-011-9284-2.
13. Abraham P, Picquet J, Vielle B, et al. Transcutaneous oxygen pressure measurements on the buttocks during exercise to detect proximal arterial ischemia: comparison with arteriography. *Circulation*. 2003;107(14):1896–1900. Doi: 10.1161/01.CIR.0000060500.60646.E0.
14. Abraham P, Ramondou P, Hersant J, et al. Investigation of arterial claudication with transcutaneous oxygen pressure at exercise: Interests and limits. *Trends Cardiovasc Med*. 2021;31(4):218–223. Doi: 10.1016/j.tcm.2020.03.003.
15. Stonko DP, Hicks CW. Current management of intermittent claudication. *Advances in Surgery*. 2023;57(1):103–113. Doi: 10.1016/j.yasu.2023.04.009.
16. Hersant J, Ramondou P, Picquet J, et al. Relationship between the severity of exercise induced ischaemia and the prevalence of exercise induced calf symptoms during treadmill testing with transcutaneous oximetry. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2022;63(5):707–713. Doi: 10.1016/j.ejvs.2022.01.011.
17. Woo Y, Suh YJ, Lee H, et al. TcPO₂ value can predict wound healing time in clinical practice of CLTI patients. *Annals of Vascular Surgery*. 2023;91:249–256. Doi: 10.1016/j.avsg.2022.11.020.
18. Braet DJ, Pourak K, Delbono L, et al. Comparative evaluation of transcutaneous oxygen tension and ankle-brachial index as predictors of reoperation following below-knee amputation. *Journal of Vascular Surgery*. 2024;80(1):223–231. Doi: 10.1016/j.jvs.2024.02.031.
19. Abraham P, Gu Y, Guo L, et al. Clinical application of transcutaneous oxygen pressure measurements during exercise. *Atherosclerosis*. 2018;276:117–123. Doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2018.07.023.
20. Tueguem MT, Jehannin P, Le Pabic E, et al. Test-retest reliability and minimal detectable change in exercise oximetry in claudicants. *Annals of Vascular Surgery*. 2024;99:19–25. Doi: 10.1016/j.avsg.2023.09.095.
21. Vannier C, Guezais A, Talbot M, et al. Relationship between exercise transcutaneous oxygen pressure measurements with constant and graded treadmill tests. *Vasc Med*. 2025;30(6):676–682. Doi: 10.1177/1358863X251379810.
22. Иванов С. В., Кудряшов В. Э., Беленький Ю. В. Оценка артериальной недостаточности нижних конечностей по показателям транспорта кислорода в тредмил-тесте. Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 1992. № 5–6. С. 29. [Ivanov SV, Kudryashov VE, Belenkiy YuV. Evaluation of lower extremity arterial insufficiency using oxygen transport parameters in a treadmill test. *Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 1992;(5–6):29. (In Russ.)].
23. Crawford F, Welch K, Andras A, Chappell FM. Ankle brachial index for the diagnosis of lower limb peripheral arterial disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016; 9. Doi: 10.1002/14651858.
24. Guo Q. Comparison and evaluation of negative pressure wound therapy versus standard wound care in the treatment of diabetic foot ulcers. *BMC Surg*. 2025;25(1):208. Doi: 10.1186/s12893-025-02885-x.

Информация об авторах

Бедров Александр Ярославович – д-р мед. наук, доцент, профессор кафедры, зав. отделением сосудистой хирургии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: abedrov@gmail.com.

Белова Ксения Александровна – аспирант кафедры, сосудистый хирург, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ksens96@mail.ru.

Моисеев Алексей Андреевич – канд. мед. наук, ассистент кафедры, сосудистый хирург, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: moiseev85@mail.ru.

Байкова Анна Вадимовна – канд. мед. наук, ассистент кафедры, сосудистый хирург, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: baikova93@mail.ru.

Крутиков Александр Николаевич – канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ankrutikov@yandex.ru.

Ганенко Ольга Сергеевна – зав. отделением восстановительного лечения и медицинской реабилитации № 2, врач по лечебной физкультуре, Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ogranenko@rambler.ru.

Назимова Марина Владиленовна – врач по лечебной физкультуре отделения восстановительного лечения и медицинской реабилитации № 2, Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: nazimova_mv@almazovcentre.ru.

Хубулава Геннадий Григорьевич – академик РАН, д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой хирургии факультетской с курсами лапароскопической и сердечно-сосудистой хирургии с клиникой, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ggkh07@rambler.ru.

Authors information

Bedrov Alexander Ya. – Dr. Med. Sci., Associate Professor, Professor, Department of Hospital Surgery; Head, Department of Vascular Surgery, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: abedrov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8382-1127.

Belova Ksenia A. – PhD Student, Vascular Surgeon, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: ksens96@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5081-8148.

Moiseev Alexey A. – Cand. Med. Sci., Department Assistant, Vascular Surgeon, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: moiseev85@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9923-4688.

Baykova Anna V. – Cand. Med. Sci., Department Assistant, Vascular Surgeon, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: baikova93@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0432-1480.

Krutikov Alexander N. – Cand. Med. Sci., Leading Research Fellow, Almazov National Medical Research Center, Saint

Petersburg, Russia, e-mail: ankrutikov@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6897-6171.

Ganenko Olga S. – Head, Department of Restorative Treatment and Medical Rehabilitation № 2, Physiotherapy Physician, Almazov National Medical Research Center, Saint Petersburg, Russia, e-mail: oganenko@rambler.ru, ORCID: 0000-0001-7989-3785.

Nazimova Marina V. – Physical Therapist, Department of Restorative Treatment and Medical Rehabilitation № 2, Almazov National Medical Research Center, Saint Petersburg, Russia, e-mail: nazimova_mv@almazovcentre.ru, ORCID: 0009-0000-9659-914X.

Khubulava Gennadiy G. – Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Med. Sci., Professor, Head, Faculty Surgery Department, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: ggkh07@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-9242-9941.