

УДК 616-056.52; 616.16

<https://doi.org/10.24884/1682-6655-2026-25-1-22-29>

И. В. ТРУНОВ¹, А. А. ФЕДОРОВИЧ^{1, 2}, А. И. КОРОЛЕВ¹,
В. С. ОСОСКОВ¹, О. М. ДРАПКИНА¹

Микроциркуляция в коже при ожирении по данным современных неинвазивных методов исследования (обзор)

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины» Министерства Здравоохранения Российской Федерации
101990, Россия, Москва, Петроверигский пер., д. 10/3

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр Российской Федерации «Институт медико-биологических проблем» Российской Академии Наук
Россия, Москва, Хорошевское ш., д. 76А

E-mail: faa-micro@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.01.2026 г.; принята к печати 27.02.2026 г.

Резюме

В обзоре приводятся литературные данные за последние 30 лет по исследованию системы микроциркуляции в коже человека при ожирении. Данные анализируются отдельно по трем видам неинвазивных методов исследования – видеокapилляроскопии, лазерной доплеровской флоуметрии и фотоплетизмографии, которые позволяют получать информацию о структурном и функциональном состоянии различных звеньев микрососудистого русла кожи – капиллярного (обменное звено), прекапиллярного (поверхностное сосудистое сплетение) и глубокого сосудистого сплетения (распределительное звено). На уровне капиллярного русла при ожирении отмечаются изменения формы капилляров и уменьшение их количества. На уровне прекапиллярных артериол отмечаются нарушение функции эндотелия и снижение реакции на дилататорные стимулы. Крупные распределительные артериолы глубокого сосудистого сплетения демонстрируют увеличение индексов жесткости и резистивности. Большинство работ посвящено изучению микроциркуляции у пациентов с ожирением на фоне ассоциированных заболеваний, таких как сахарный диабет, метаболический синдром, артериальная гипертензия и другие, наличие которых само по себе может оказывать существенное влияние на параметры микроциркуляторного кровотока. Работы, в которых исследуется микроциркуляция в коже у пациентов с ожирением без каких-либо сопутствующих заболеваний, носят единичный характер. Также при анализе литературных данных не выявлено работ, в которых исследуются особенности структурно-функционального состояния МЦР в зависимости от фенотипа ожирения.

Ключевые слова: ожирение, метаболический синдром, микроциркуляция, видеокapилляроскопия, лазерная доплеровская флоуметрия, фотоплетизмография

Для цитирования: Трунов И. В., Федорович А. А., Королев А. И., Ососков В. С., Драпкина О. М. Микроциркуляция в коже при ожирении по данным современных неинвазивных методов исследования (обзор). Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2026;25(1):22–29. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2026-25-1-22-29>.

UDK 616-056.52; 616.16

<https://doi.org/10.24884/1682-6655-2026-25-1-22-29>

Ilya V. TRUNOV¹, Andrey A. FEDOROVICH^{1, 2},
Andrey I. KOROLEV¹, Vitaly S. OSOSKOV¹,
Oksana M. DRAPKINA¹

Skin Microcirculation in Obesity Using Modern Non-Invasive Research Methods (review)

¹ National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine
10/3, Petroverigsky per., Moscow, Russia, 101990

² Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
76A, Khoroshevskoe shosse, Moscow, Russia, 123007

E-mail: faa-micro@yandex.ru

Received 10.01.26; accepted 27.02.26

Summary

This review presents literature data from the past 30 years on the microcirculation system in human skin in obesity. The data are analyzed separately using three types of noninvasive research methods – videocapillaroscopy, laser Doppler flowmetry, and photoplethysmography – which provide information on the structural and functional state of various components of the skin microvascular bed: the capillary (exchange link), precapillary (superficial vascular plexus), and deep vascular plexus (distribu-

tion link). At the capillary bed level, obesity is associated with changes in capillary shape and a decrease in their number. At the precapillary arteriolar level, impaired endothelial function and a reduced response to dilator stimuli are observed. Large distributing arterioles of the deep vascular plexus exhibit increased stiffness and resistivity indices. Most studies examine microcirculation in obese patients with associated conditions such as diabetes, metabolic syndrome, hypertension, and others, the presence of which can significantly impact microcirculatory blood flow parameters. Studies examining skin microcirculation in obese patients without any comorbidities are rare. A review of the literature also revealed no studies examining the structural and functional characteristics of microcirculation depending on the obesity phenotype.

Keywords: *obesity, metabolic syndrome, microcirculation, videocapillaroscopy, laser Doppler flowmetry, photoplethysmography*

For citation: *Trunov I. V., Fedorovich A. A., Korolev A. I., Ososkov V. S., Drapkina O. M. Skin Microcirculation in Obesity Using Modern Non-Invasive Research Methods (review). Regional Hemodynamics and Microcirculation. 2026;25(1):22–29. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2026-25-1-22-29>.*

Введение

Расстройства микроциркуляции играют крайне важную роль в патогенезе многих заболеваний, в том числе ассоциированных с ожирением, в связи с чем объективная регистрация возникающих микроциркуляторных нарушений может как дать достаточно данных в более глубоком понимании происхождения различных симптомов заболевания, так и оказать помощь в более дифференцированном подборе медикаментозной терапии [1].

Микрососудистое русло является противоположным сердцу «полюсом» большого круга кровообращения [2], где не просто происходит переход артериальной системы в венозную, но осуществляется основная функция сердечно-сосудистой системы – обмен между кровью и тканями питательными веществами и продуктами жизнедеятельности клеток, что обеспечивает поддержание обменных процессов на уровне всех органов и систем целостного организма.

Ожирение, определяемое как избыточное накопление жировой ткани, является системным метаболическим сбоем, который обусловлен либо нарушениями в системе микроциркуляции, либо оказывают прямое повреждающее действие на сложно организованную систему обменных микрососудов.

Морфологические нарушения микроциркуляторного русла при ожирении представляют собой целый комплекс, который характеризуется изменениями капиллярного кровотока, утолщением стенок микрососудов, повышением их проницаемости для жидкости и белка с преимущественным направлением субстратов из крови в ткань [3], что обусловлено развитием инсулинорезистентности, хронического субклинического воспаления, оксидативного стресса и дислипидемии [4]. Адипоциты и инфильтрирующие жировую ткань макрофаги секретируют избыточное количество провоспалительных цитокинов (фактор некроза опухоли- α , интерлейкин-6 и др.), которые подавляют синтез вазопротективного оксида азота (NO), вызывая вазоконстрикцию, пролиферацию гладкомышечных клеток и ремоделирование сосудистой стенки [5].

В настоящее время кожная микроциркуляция стала клинически значимой моделью для изучения реактивности микрососудов и функции эндотелия, в том числе при ожирении, при котором изменения носят системный характер и могут быть зарегистрированы различными неинвазивными методами исследования. Факт, что кожная микроциркуляция взаимосвязана с состоянием микроциркуляторного кровотока в остальных органах и системах [6], позволяет исследова-

вателям использовать кожу как модельный орган для изучения системных нарушений микроциркуляторного кровотока [6–8].

Учитывая сложно организованную (трехзвенную) систему микроциркуляторного русла (МЦР) кожи, которое включает два микрососудистых сплетения (глубокое и поверхностное) и обменное (капиллярное) звено микрососудов, была поставлена цель – изучить литературные данные о функциональном состоянии МЦР на основе трех неинвазивных методов исследования (видеокапилляроскопии, лазерной доплеровской флоуметрии, фотоплетизмографии), которые позволяют оценить функциональное состояние каждого из звеньев МЦР кожи при ожирении [9].

Материалы и методы исследования

Поиск публикаций проводился на электронных ресурсах PubMed, MEDLINE, Scopus, Web of Science, e-library, cyberleninka. Период поиска – с 1995 по 2025 год. Поиск литературных данных в научных медицинских журналах осуществлялся по следующим ключевым словам и словосочетаниям: микроциркуляция (microcirculation), ожирение (obesity), метаболический синдром (metabolic syndrome), видеокапилляроскопия (capillaroscopy), лазерная доплеровская флоуметрия (laser doppler flowmetry), фотоплетизмография (photoplethysmography).

Результаты исследования и их обсуждение

Видеокапилляроскопия (ВКС). В норме капиллярное русло в области ногтевого ложа имеет упорядоченную, гомогенную структуру, которую часто сравнивают с «частоколом» или «гребенкой». Капилляры расположены параллельно друг другу, их апикальные части ориентированы перпендикулярно длинной оси пальца, отсутствуют извитость и перекресты артериального и венозного отделов капилляров.

В работе M. Shikama et al. (2021) изучалась связь между абдоминальным ожирением и увеличением количества перекрещивающихся капилляров у пациентов с сахарным диабетом 2-го типа (СД). В результате проведенного анализа с помощью многофакторной логистической регрессии с поправкой на возраст, пол, курение, регулярные физические нагрузки, уровень гликированного гемоглобина, гипертонию и дислипидемию было показано, что увеличение индекса массы тела (ИМТ) в течение жизни было достоверно связано с процентом перекрещивающихся капилляров и увеличением их количества [10].

По мнению L. Lavie et al. (2015), которые, проводили анализ медицинских документов лиц

с ожирением и синдромом обструктивного апноэ сна, данному процессу способствует вырабатываемые воспалительные цитокины и активные формы кислорода, приводящие к появлению расширенных и извилистых капилляров [11].

В другом ретроспективном исследовании M. Shikama et al. (2024) провели анализ связи ИМТ с изменениями капилляров ногтевого ложа у 65 пациентов (40–75 лет) с ожирением и СД. Установлено, что в отличие от здоровых людей у лиц с ожирением и СД наблюдается значительное увеличение количества скрученных (штопорообразных) капилляров [12].

К аналогичным выводам пришли и K. Bogusz-Góna et al. (2023), которые сравнивали группу здоровых детей и подростков, страдающих ожирением на фоне сахарного диабета 1-го типа. Авторы пришли к выводу, что извилистые капилляры напрямую коррелировали с большим объемом жировой ткани и большей толщиной кожных складок [13].

Считается, что перициты, окружающие стенки капилляров и посткапиллярных венул, крайне чувствительны к воспалению и окислительному повреждению. Взяв во внимание факт важной роли перицитов в сохранении структурной целостности сосудов МЦР, M. Shikama (2021) и N. Warmke (2016) предположили, что пересечение капилляров ногтевого ложа происходит из-за гибели перицитов [10, 14].

В пользу данных выводов могут служить и результаты исследований на лабораторных животных, у которых изучалась взаимосвязь ожирения и разрежение капиллярного русла. Как показало исследование S. Raavonsalo et al. (2020), уменьшение количества капилляров является результатом потери перицитов, а степень потери зависит от продолжительности и выраженности ожирения [15].

В 2022 году S. Nakajima et al. опубликовали результаты исследования параметров капилляров ногтевого ложа в зависимости от образа жизни. Исследовались длина капиллярной петли от нижней до верхней точки, ширина параллельных кровеносных сосудов, расстояние между верхними точками капиллярных петель, а также боковой и верхний диаметры капиллярной петли. Полученные авторами результаты показали, что морфология капилляров ногтевого ложа может изменяться в течение короткого периода времени (вплоть до недели) после коррекции образа жизни и снижения массы тела [16].

Аналогичные результаты были продемонстрированы и в работе K. Miyoshi et al. (2025) у пациентов с ожирением и СД. В процессе исследования участникам дважды проводили капилляроскопию – при поступлении и перед выпиской из стационара. В период госпитализации (1 неделя) проводились коррекция рациона питания, физической активности и медикаментозная терапия. Предпринятый комплекс мер позволил за 7 дней снизить ИМТ в среднем с 28,8 кг/м² до 27,9 кг/м². На этом фоне авторы отмечают увеличение длины капилляров без увеличения их диаметра. Дополнительно было отмечено усиление контрастности капилляров, что авторы связывают с уменьшением объема внеклеточной жидкости. Это свидетельствует о том, что снижение ИМТ за счет уменьшения внекле-

точной жидкости может способствовать повышению контрастности капиллярного русла кожи [17].

В исследовании L. Kraemer-Aguiar et al. (2008) сравнивались параметры капиллярного русла пациентов с метаболическим синдромом (МС) на фоне рассеянного склероза (РС) с группой здоровых добровольцев. У пациентов с МС и РС отмечено достоверно более меньшие диаметры всех отделов капилляров (артериального, переходного и венозного) и более низкая функциональная плотность капилляров на квадратный миллиметр [18].

Жировая ткань, являющаяся «активным эндокринным органом», путем продукции адипоцитами адипокинов оказывает прямое влияние на МЦР [19]. В своих исследованиях C. Cheng и C. Daskalakis (2015) указывают на прямую взаимосвязь между повышением уровня С-реактивного белка, интерлейкина-6, фактора некроза опухоли-α и ингибитора активатора плазминогена-1 со степенью снижения плотности капилляров, которая особенно выражена у молодых людей с ожирением [20]. Следовательно, можно прийти к заключению, что количество висцеральной жировой ткани обратно пропорционально функциональной плотности капиллярной сети ногтевого ложа, на что указывают R. T. de Jongh et al. [21].

Достаточно интересные данные были получены в рандомизированном контролируемом исследовании C. Buss et al. (2020), которые изучали реакцию МЦР в цефалическую фазу пищеварения у лиц, страдающих ожирением. Было показано, что в цефалическую фазу пищеварения (до момента попадания пищи в рот) параллельно с активацией желудочно-кишечного тракта происходит стимуляция системы микроциркуляции, что проявляется увеличением количества функционирующих капилляров и объема перфузии тканей. Реакция МЦР оценивалась морфометрическим методом (анализ структуры и количества капилляров по стоп-кадрам, функциональная плотность капилляров) и динамическим (анализ скорости кровотока по видеозаписям в покое и во время постокклюзионной реактивной гиперемии). Установлено, что функциональная плотность капиллярной сети у лиц, страдающих ожирением, не претерпела изменений, в то время как у здоровых лиц такая разница была, что свидетельствует об отсутствии капиллярного рекрутирования у лиц с ожирением [22].

Лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ). При анализе работ, посвященных изучению состояния периферического кровотока при ожирении методом ЛДФ, все полученные данные можно условно разделить на исследования, в которых анализируются данные базального кровотока и данные, полученные при выполнении функциональных тестов, оценивающих функциональный резерв МЦР.

Анализ функционального состояния микрососудов кожи при базальной перфузии демонстрируют неоднозначные результаты, что, вероятно, связано с компенсаторными механизмами организма. Исследования часто фиксируют отсутствие каких-либо изменений при базальном кровотоке.

В работе А. И. Королева и др. (2020) установлено, что по данным ЛДФ у условно здоровых нормотен-

живных мужчин трудоспособного возраста (средний возраст 44 года), которые не принимали никакой медикаментозной терапии на постоянной основе и субъективно считали себя полностью здоровыми, в состоянии покоя и при дыхательном констрикторном тесте различия в функциональном состоянии регуляторных механизмов микроциркуляции не выявляются. Различия выявляются только при проведении пробы с пятиминутной артериальной окклюзией – постокклюзионной реактивной гиперемией (ПОРГ). Авторы отмечают, что по мере увеличения ИМТ имеет место прогрессивное снижение дилаторного резерва МЦР при ПОРГ и в коже предплечья, и в коже пальца [23].

В другой работе С. Morrissey et al. (2018) оценивали кожную перфузию в состоянии покоя и при ПОРГ при изменении образа жизни у подростков с ожирением. Исследуемые были распределены на две группы – первая участвовала три месяца в умеренных непрерывных физических тренировках, вторая – в высокоинтенсивных интервальных тренировках. Показатели МЦР оценивали до и после изменения образа жизни. Исходно у подростков с ожирением ПОРГ и площадь под кривой реактивной гиперемии после окклюзии были выше, чем у подростков с нормальным весом. Эти показатели остались неизменными после выполненной программы тренировок. Однако соотношение пикового и базального кровотока снизилось в обеих группах из-за увеличения уровня базального кровотока. Данные, полученные в процессе исследования, позволили авторам сделать вывод, что физические упражнения, какими бы они ни были, не улучшают дилаторный резерв МЦР [24].

В 2017 году была опубликована работа D. J. van der Heijden et al., в которой проводился анализ вазомоторной функции эндотелия плечевой артерии при пробе с поток-зависимой вазодилатацией (проба Целермайера) и реакция МЦР в коже волярной поверхности ногтевой фаланги пальца методом ЛДФ. В исследование вошли пациенты с подтвержденной ишемической болезнью сердца, с гипертонической болезнью и ожирением. Результаты исследования показали прямую и выраженную связь между высоким ИМТ со снижением функции эндотелия как в магистральных сосудах мышечно-эластического типа, так и в микрососудах кожи. На основании полученных данных авторы сделали вывод, что ожирение является независимым предиктором снижения функции эндотелия как у пациентов с подозрением на наличие сосудистых заболеваний, так и при уже установленной патологии сосудов магистрального типа. Авторами показана связь между ИМТ и микрососудистой эндотелиальной дисфункцией даже с учетом таких факторов кардиометаболического риска, связанных с ожирением, как гипертония, гиперхолестеринемия и СД [25].

К похожим выводам в своем исследовании пришли и S. M. Lanting et al. (2021), которые изучали пациентов с СД и ожирением 1–2 степени. Методом ЛДФ они оценивали реакцию МЦР при ПОРГ, а также измеряли лодыжечно-плечевой и пальце-плечевой индексы. Результаты исследования продемонстрировали четкую связь между ожирением и нарушением

функции микрососудов кожи, а также позволили предположить, что патологическое влияние ожирения на функцию микрососудов кожи может наблюдаться и при отсутствии явных нарушений функции магистральных (плечевой) сосудов мышечно-эластического типа [26].

В другом исследовании J. K. Limberg et al. (2010) изучали реакцию кровотока на динамические упражнения у молодых людей с ожирением и получили противоположные результаты. По их данным, у молодых людей с ожирением сохраняется способность к расширению сосудов в предплечьях, что противоречит результатам, которые были получены в других исследованиях у людей с ожирением [25, 27]. Авторы исследования предположили, что расширение сосудов играет меньшую роль в контроле кровотока во время физической нагрузки по сравнению с метаболическими, нервными и механическими факторами. Возможно, что нарушения в работе эндотелия маскируются компенсаторными механизмами контроля тонуса стенки микрососудов, которые сегодня еще очень мало изучены. Например, нарушение расслабления сосудов под действием оксида азота может компенсироваться повышением уровня гиперполяризующего эндотелиального фактора [28].

Так, в работе I. O. Andreieva et al. (2021), в которой исследовалось состояние микрокровотока в коже у лиц с различной степенью ожирения без сердечно-сосудистых заболеваний, было показано, что у пациентов с ожирением наблюдаются начальные проявления микроциркуляторных расстройств, которые характеризуются снижением функции эндотелия микрососудов с увеличением вклада в перфузию пульсовых колебаний микрокровотока, что суммарно приводит к снижению уровня перфузии. По результатам регрессионного анализа было показано, что только высокий ИМТ был связан с нарушением функции эндотелия микрососудов [27].

Интересные результаты у подростков с ожирением на доклинической стадии сердечно-сосудистых заболеваний были получены E. Fusco et al. (2020). В исследовании оценивались изменения микроциркуляции кожи при пробе с артериальной окклюзией, которые показали более низкие значения уровня перфузии кожи предплечья как до окклюзии, так и при ПОРГ, которые были напрямую связаны со степенью ожирения [29].

Весьма интересными являются результаты исследования динамики микроциркуляторного кровотока у пациентов с крайними степенями ожирения после проведения бариатрических операций. В работе В. Gryglewska et al. (2020) изучались изменения МЦР в процессе ПОРГ. По результатам регрессионного анализа было установлено, что через шесть месяцев после бариатрической операции время достижения максимального кровотока сократилось, а площадь гиперемии под кривой увеличилась. По мнению авторов, полученные результаты подтверждают гипотезу, что нормализация массы тела напрямую влияет на функциональные резервы МЦР [30].

В другом исследовании авторы проводили оценку изменения микроциркуляторного кровотока через

год после проведения лапароскопической рукавной гастропластики. Было показано, что через год после проведенной операции и снижения массы тела все параметры ПОРГ значительно улучшались. Авторы выдвинули предположение, что данные улучшения, по-видимому, связаны с исходной тяжелой степенью инсулинорезистентности и восстановлением чувствительности к инсулину после оперативного вмешательства [31].

В другом комплексном исследовании изучалось влияние низких доз эстрогена на эндотелиальные и воспалительные биомаркеры у женщин с избыточным весом или ожирением в период менопаузы. Кроме изучения реактивности микрососудов и амплитуды вазомоций были количественно оценены уровни биомаркеров воспаления (С-реактивного белка, интерлейкина-1 β , интерлейкина-6, моноцитарного хемотаксического белка-1 и факторов некроза опухоли- α), а также повреждения сосудов (активированных циркулирующих эндотелиальных клеток) и восстановления (эндотелиальных клеток-предшественников). Полученные авторами данные показали, что краткосрочный курс терапии низкими дозами эстрадиола у женщин в период менопаузы с избыточным весом или ожирением повысил уровень маркеров восстановления сосудов и улучшил реактивность микрососудов без изменения уровня воспалительных биомаркеров [32].

Фотоплетизмография (ФПГ). Многими исследователями отмечается изменение показателей эластотонических свойств терминальных артериальных сосудов мышечного типа у пациентов с ожирением. В 2018 году L. M. Walter et al., исследуя детей и подростков (3–18 лет) с ожирением и обструктивным апноэ сна, выявили увеличение показателя артериальной жесткости при ожирении относительно детей и подростков с нормальным весом. При нарушении дыхания во сне и ожирении показатель сосудистой жесткости был выше, чем в группе детей и подростков с нарушениями дыхания во сне, но с нормальным весом [33].

В другом исследовании у пациентов с МС и неалкогольной жировой болезнью печени (средний возраст 60 лет) по данным ФПГ отмечается увеличение индекса жесткости, индекса резистентности (RI) и индекса аугментации. При проведении пробы с ПОРГ отмечаются снижение индекса окклюзии по амплитуде и укорочение времени сдвига фаз между каналами, что указывает на вазомоторную дисфункцию эндотелия в терминальных артериях мышечного типа (пальцевые) и распределительных артериол (50–150 мкм) из глубокого сосудистого сплетения кожи. Взаимосвязь ИМТ с параметрами ФПГ в данном исследовании не анализировалась [34].

В работе В. А. Дадаевой и др. (2021) проводилось исследование в большой группе (n=164) условно здоровых нормотензивных мужчин трудоспособного возраста (средний возраст 44 года), которые субъективно считали себя абсолютно здоровыми и не принимали никаких медикаментозных препаратов на постоянной основе. Интересно, что из всей группы только 38 человек (23 %) имели нормальный ИМТ,

а остальные 126 (77 %) мужчин имели избыточный вес или ожирение 1 степени. При контурном анализе пульсовой волны в группе с повышенным ИМТ и ожирением отмечается достоверное увеличение RI относительно мужчин с ИМТ меньше 25 кг/м². Также в группе мужчин с повышенным ИМТ по данным ФПГ отмечается незначительное, но достоверное снижение уровня сатурации крови – 95,3 % против 95,9 % в группе с нормальным весом [35].

В другом исследовании проводилась оценка реакции МЦР при ФПГ на отражение на фоне проведения тепловой пробы у пациентов с морбидным ожирением, которым выполнялись бариатрические операции. Было выявлено, что у пациентов с ожирением до операции реакция перфузии при ФПГ на локальное нагревание была значительно ниже, чем в контрольной группе, но через 6 месяцев после операции она приблизилась к показателям контрольной группы на фоне снижения ИМТ с 48 \pm 5 до 36 \pm 5 кг/м². Исходя из полученных данных, авторы сделали вывод, что микрососудистые нарушения, вызванные ожирением, могут быть нивелированы после бариатрической операции, снижения массы тела и последующего консервативного лечения [36].

В контексте применения метода ФПГ весьма интересны результаты работы P. Lanka et al. (2020), в которой изучалась возможность применения метода широкополосной диффузионной оптической спектроскопии (длины волн от 600 до 1100 нм, расстояние от источника света до фотоприемника от 1 до 3 см) для неинвазивного мониторинга висцерального жира. Исходя из физических принципов биофотоники, данный метод исследования можно условно сопоставить с данными ФПГ на отражение. Проведя пилотное исследование на 10 добровольцах с различным ИМТ, авторы пришли к выводу, что у лиц с ожирением наблюдаются изменения анатомии/физиологии кожи (толщины кожи, трансэпидермальной гидратации тканей, интенсивности кожного кровотока и др.), что, в свою очередь, приводит к изменению оптических свойств анализируемого отраженного сигнала. Основным выводом, которые сделали исследователи – при увеличении толщины подкожной жировой клетчатки у людей с ожирением показатели поглощения и коэффициента рассеяния значительно ниже, чем у здоровых лиц [37].

К похожим результатам пришли и T. Woonya-Ananta et al. (2021), которые в своей работе использовали метод математического моделирования переноса света в биологических тканях с использованием метода Монте-Карло. Полученные теоретические расчеты показали, что увеличение ИМТ существенно влияет на форму фотоплетизмографического сигнала, а именно снижение амплитуды сигнала и уровня периферической перфузии [38].

В данном контексте очень интересна и другая работа, в которой оценивались результаты ФПГ, полученные с помощью портативных устройств ФПГ (на отражение). Авторы изучали проблему доли погрешности данных, полученных с носимых устройств у людей с более темным оттенком кожи и высоким индексом ИМТ. После проведенного анализа научной

литературы авторы пришли к выводу, что полученные данные указывают на снижение коэффициента поглощения света как в дерме, так и в подкожной клетчатке, а также на увеличение ослабленного рассеяния как в эпидермисе, так и в дерме. При длине волны 544 нм (типичной для ФПГ на носимых устройствах) относительная процентная разница коэффициента поглощения между кожей с высоким и низким ИМТ составила 49 % в подкожной клетчатке, 19 % в дерме и незначительно в эпидермисе, тогда как относительная разница в уменьшенном коэффициенте рассеяния составила 21, 29 и 165 % соответственно [39].

Заключение

Проведенный анализ современных научных данных позволяет констатировать, что комплексное применение методов ВКС, ЛДФ и ФПГ предоставляет всестороннюю и высокоинформативную характеристику состояния МЦР кожи у пациентов с ожирением.

Совокупность результатов, полученных данными методами, выявляет четкие паттерны микрососудистой дисфункции. ВКС на уровне обменного звена МЦР демонстрирует структурные изменения на уровне ногтевого ложа, проявляющиеся в виде увеличения размеров, формы и дезорганизации капиллярных петель, а также снижения их плотности, что свидетельствует о начале ремоделирования обменных микрососудов. ЛДФ на уровне прекапиллярных артериол и посткапиллярных венул (поверхностное сосудистое сплетение) выявляет ключевые функциональные нарушения – изменение базального кровотока и, что более значимо, выраженное снижение функционального резерва МЦР. Ослабление эндотелий-зависимой вазодилатации в пробе с ПОРГ является одним из важнейших звеньев патогенеза, подтверждая ведущую роль эндотелиальной дисфункции, которая обусловлена инсулинорезистентностью, оксидативным стрессом и хроническим воспалением. Данные ФПГ на уровне крупных распределительных артериол из глубокого сосудистого сплетения демонстрируют снижение амплитуды пульсовой волны на периферии, объективно отражая ухудшение артериального притока и повышенный тонус резистивных микрососудов и терминальных артерий мышечного типа, что интегрирует нарушения на уровне микроциркуляции в общий контекст системной гемодинамики.

Таким образом, ожирение ассоциировано с формированием патологического варианта кожной микроциркуляции, которое характеризуется комбинацией структурного ремоделирования капилляров, резкого ограничения функциональных резервов и нарушением вазомоторной регуляции. Выявленные изменения не только являются ранними маркерами кардиометаболического риска, но и вносят существенный вклад в патогенез связанных/сопряженных с ожирением осложнений. Перспективы дальнейших исследований видятся в использовании данных неинвазивных методов исследования микроциркуляции для персонализированной оценки функциональных и структурных нарушений на доклинической стадии развития патологии, стратификации индивидуального риска

и оценки эффективности терапевтических вмешательств, направленных на улучшение функции эндотелия и микроциркуляторного кровотока.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что, несмотря на обширное количество работ, посвященных изучению функционального состояния магистральных сосудов и центральной гемодинамики при ожирении, аспекты, связанные с дисфункцией микроциркуляторного русла (МЦР), остаются недостаточно исследованными. Подавляющее число работ посвящено изучению микроциркуляции у пациентов с ожирением на фоне ассоциированных заболеваний (СД, МС, АГ, обструктивное апноэ сна и др.), наличие которых само по себе может оказывать существенное влияние на параметры микроциркуляторного кровотока. Работы, в которых исследуется состояние микроциркуляции у пациентов с ожирением без каких-либо сопутствующих заболеваний, носят единичный характер [23, 24, 27]. Также при анализе литературных данных не удалось найти ни одной работы, в которой оценивались бы особенности структурно-функционального состояния МЦР в зависимости от фенотипа ожирения (метаболически здоровый и метаболически нездоровый фенотип).

Основными лимитирующими факторами развития данного направления функциональной диагностики являются методические сложности, включая технические ограничения и отсутствие унифицированных протоколов интерпретации данных, а также экономико-организационные барьеры, такие как стоимость оборудования, отсутствие страхового возмещения (исследования микроциркуляции не входят в стандарты страховой медицины, включая ОМС), что в итоге необоснованно снижает их клиническую востребованность.

Тем не менее объективная оценка микроциркуляторных расстройств представляет значительную научную и клиническую ценность. Такие исследования позволяют не только глубже понять патогенез клинических проявлений ожирения на уровне микрососудистого русла, но и способствуют персонализированному подходу к выбору тактики лечения пациентов с данной патологией.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Финансирование / Financing

Работа выполнена в рамках инициативной НИР по исследованию микроциркуляции при ожирении. / The work was conducted as part of an independent research project on microcirculation in obesity.

Литература / References

1. Ковалева М. А., Жмеренецкий К. В. Обзор прямых методов изучения микроциркуляции и оценки полученных данных // Журн. мед.-биол. исследований. 2020. Т. 8, № 1. С. 79–88. [Kovaleva MA, Zhmerenetskiy KV. Review of direct methods for studying microcirculation and evaluating the data obtained. Journal of Medical and Biological Research.

2020;8(1):79–88. (In Russ.]. Doi: 10.17238/issn2542-1298.2020.8.1.79.

2. Федорович А. А. Микрососудистое русло кожи человека как объект исследования // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017. Т. 16, № 4. С. 11–26. [Fedorovich AA. Microcirculation of the human skin as an object of research. Regional blood circulation and microcirculation. 2017;16(4):11–26. (In Russ.]. Doi: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-11-26.

3. Зелинский Б. А., Сокур С. А. Патофизиология микроциркуляторного русла при ожирении // Проблемы эндокринологии. 1995. Т. 41, № 4. С. 21–23. [Zelinsky BA, Sokur SA. Pathophysiology of the microcirculatory bed in obesity. Problems of Endocrinology. 1995;41(4):21–23. (In Russ.]. Doi: 10.14341/probl11458.

4. de Jongh RT, Serné EH, Ijzerman RG, et al. Impaired microvascular function in obesity: implications for obesity-associated microangiopathy, hypertension, and insulin resistance. *Circulation*. 2004;109(21):2529–2535. Doi: 10.1161/01.CIR.0000129772.26647.6F. PMID: 15136505.

5. Serné EH, de Jongh RT, Eringa EC, et al. Microvascular dysfunction: a potential pathophysiological role in the metabolic syndrome. *Hypertension*. 2007;50(1):204–211. Doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.107.089680.

6. Holowatz LA, Thompson-Torgerson CS, Kenney WL. The human cutaneous circulation as a model of generalized microvascular function. *J Appl Physiol* (1985). 2008;105(1):370–372. Doi: 10.1152/jappphysiol.00858.2007.

7. Бойко В. В., Соболева Г. Н., Федорович А. А., Кирдяшккина Т. А. Атеросклероз и микроциркуляция. Результаты пилотного исследования микроциркуляции у пациентов с ишемической болезнью сердца // Кардиологический Вестник. 2016. Т. 11, № 2. С. 48–55. [Boiko VV, Soboleva GN, Fedorovich AA, Kirdjaschkina TA. Atherosclerosis and microcirculation. Results of the pilot study of microcirculation in patients with coronary artery disease. Russian Cardiology Bulletin. 2016;11(2):48–55. (In Russ.]. eLIBRARY ID: 26151560.

8. Martini R, Bagno A. The wavelet analysis for the assessment of microvascular function with the laser Doppler fluxmetry over the last 20 years. Looking for hidden informations. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2018;70(2):213–229. Doi: 10.3233/CH-189903.

9. Федорович А. А., Королев А. И., Ососков В. С. и др. Новые тренды развития направления по неинвазивному исследованию микроциркуляции в коже человека. Описательный обзор // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2025. Т. 24, № 6. С. 94–104. [Fedorovich AA, Korolev AI, Ososkov VS, et al. New trends in the development of the direction of non-invasive study of microcirculation in human skin. Descriptive review. Cardiovascular Therapy and Prevention. 2025;24(6):94–104. (In Russ.]. Doi: 10.15829/1728-8800-2025-4412.

10. Shikama M, Sonoda N, Morimoto A, et al. Association of abdominal obesity with crossing capillaries in the finger nailfold in type 2 diabetes mellitus. *Diabetol Int*. 2021;12(3):260–267. Doi: 10.1007/s13340-020-00480-4.

11. Lavie L. Oxidative stress in obstructive sleep apnea and intermittent hypoxia--revisited--the bad ugly and good: implications to the heart and brain. *Sleep Med Rev*. 2015;20:27–45. Doi: 10.1016/j.smrv.2014.07.003.

12. Shikama M, Suga S, Tajima T, et al. Association between maximum lifetime body mass index and nailfold capillary changes in patients with type 2 diabetes mellitus. *Cureus*. 2024;16(12):e75411. Doi: 10.7759/cureus.75411.

13. Bogusz-Górna K, Polańska A, Dańczak-Pazdrowska A, et al. Non-invasive detection of early microvascular changes in juveniles with type 1 diabetes. *Cardiovasc Diabetol*. 2023;22(1):285. Doi: 10.1186/s12933-023-02031-y.

14. Warmke N, Griffin KJ, Cubbon RM. Pericytes in diabetes-associated vascular disease. *J Diabetes Complications*. 2016;30(8):1643–1650. Doi: 10.1016/j.jdiacomp.2016.08.005.

15. Paavonsalo S, Hariharan S, Lackman MH, Karaman S. Capillary rarefaction in obesity and metabolic diseases-organ-specificity and possible mechanisms. *Cells*. 2020;9(12):2683. Doi: 10.3390/cells9122683.

16. Nakajima T, Nakano S, Kikuchi A, Matsunaga YT. Nailfold capillary patterns correlate with age, gender, lifestyle habits, and fingertip temperature. *PLoS One*. 2022;17(6):e0269661. Doi: 10.1371/journal.pone.0269661.

17. Miyoshi K, Chikamori M, Ando T, et al. Quantitative image analysis of nailfold capillaries during an in-hospital education program for type 2 diabetes or obesity. *Microvasc Res*. 2025;161:104830. Doi: 10.1016/j.mvr.2025.104830.

18. Kraemer-Aguiar LG, Laflor CM, Bouskela E. Skin microcirculatory dysfunction is already present in normoglycemic subjects with metabolic syndrome. *Metabolism*. 2008;57(12):1740–1746. Doi: 10.1016/j.metabol.2008.07.034.

19. Kagota S, Iwata S, Maruyama K, et al. Functional relationship between arterial tissue and perivascular adipose tissue in metabolic syndrome. *Yakugaku Zasshi*. 2016;136(5):693–697. [Japanese]. Doi: 10.1248/yakushi.15-00262-2.

20. Cheng C, Daskalakis C. Association of adipokines with insulin resistance, microvascular dysfunction, and endothelial dysfunction in healthy young adults. *Mediator Inflamm*. 2015:594039. Doi: 10.1155/2015/594039.

21. de Jongh RT, Ijzerman RG, Serné EH, et al. Visceral and truncal subcutaneous adipose tissue are associated with impaired capillary recruitment in healthy individuals. *J Clin Endocrinol Metab*. 2006;91(12):5100–5106. Doi: 10.1210/jc.2006-1103.

22. Buss C, Maranhao PA, de Souza MDGC, et al. Obesity blunts cephalic-phase microvascular responses to food. *Physiol Behav*. 2020;225:113087. Doi: 10.1016/j.physbeh.2020.113087.

23. Королев А. И., Федорович А. А., Горшков А. Ю. и др. Особенности микроциркуляции в коже в зависимости от индекса массы тела у мужчин с нормальным артериальным давлением // Профилактическая медицина. 2020. Т. 23, № 5. С. 144–151. [Korolev AI, Fedorovich AA, Gorshkov AYU, et al. Skin microvascular change in men with normal arterial pressure depending on body mass index. The Russian Journal of Preventive Medicine. 2020;23(5):144–151. (In Russ.]. Doi: 10.17116/profmed202023051144.

24. Morrissey C, Montero D, Raverdy C, et al. Effects of exercise intensity on microvascular function in obese adolescents. *Int J Sports Med*. 2018;39(6):450–455. Doi: 10.1055/a-0577-4280.

25. van der Heijden DJ, van Leeuwen MAH, Janssens GN, et al. Body mass index is associated with microvascular endothelial dysfunction in patients with treated metabolic risk factors and suspected coronary artery disease. *J Am Heart Assoc*. 2017;6(9):e006082. Doi: 10.1161/JAHA.117.006082.

26. Lanting SM, Way KL, Sabag A, et al. Degree of adiposity and obesity severity is associated with cutaneous microvascular dysfunction in type 2 diabetes. *Microvasc Res*. 2021;136:104149. Doi: 10.1016/j.mvr.2021.104149.

27. Andreieva IO, Riznyk OI, Myrnyi SP, Surmylo NN. State of cutaneous microcirculation in patients with obesity. *Wiad Lek*. 2021;74(9cz1):2039–2043. Doi: 10.36740/WLek202109103.

28. Limberg JK, De Vita MD, Blain GM, Schrage WG. Muscle blood flow responses to dynamic exercise in young obese humans. *J Appl Physiol* (1985). 2010;108(2):349–355. Doi: 10.1152/jappphysiol.00551.2009.

29. Fusco E, Pesce M, Bianchi V, et al. Preclinical vascular alterations in obese adolescents detected by laser-

Doppler flowmetry technique. *Nutr Metab Cardiovasc Dis.* 2020;30(2):306–312. Doi: 10.1016/j.numecd.2019.09.007.

30. Gryglewska B, Gluszevska A, Zarzycki B, et al. Post-occlusive reactive hyperemic response of skin microcirculation among extremely obese patients in the short and long term after bariatric surgery. *Microcirculation.* 2020;27(3):e12600. Doi: 10.1111/micc.12600.

31. Ministrini S, Fattori C, Ricci MA, et al. Microcirculatory improvement induced by laparoscopic sleeve gastrectomy is related to insulin sensitivity retrieval. *Obes Surg.* 2018;28(10):3151–3158. Doi: 10.1007/s11695-018-3290-0.

32. da Silva LH, Panazzolo DG, Marques MF, et al. Low-dose estradiol and endothelial and inflammatory biomarkers in menopausal overweight/obese women. *Climacteric.* 2016;19(4):337–43. Doi: 10.1080/13697137.2016.1180676.

33. Walter LM, Tamanyan K, Limawan AP, et al. Overweight and obese children with sleep disordered breathing have elevated arterial stiffness. *Sleep Med.* 2018;48:187–193. Doi: 10.1016/j.sleep.2018.05.007.

34. Драпкина О. М., Деева Т. А., Ивашкин В. Т. Оценка эндотелиальной функции и степени апоптоза у пациентов с метаболическим синдромом и неалкогольной жировой болезнью печени // *Терапевтический архив.* 2015. Т. 87, № 5. С. 76–83. [Drapkina OM, Deeva TA, Ivashkin VT. Evaluation of endothelial function and estimation of the degree of apoptosis in patients with metabolic syndrome and non-alcoholic fatty liver disease. *Therapeutic Archive.* 2015;87(5):76–83. (In Russ.)]. Doi: 10.17116/terarkh201587576-83.

35. Дадаева В. А., Королев А. И., Федорович А. А. и др. Состояние сосудистой стенки у мужчин с избыточной массой тела и ожирением // *Профилактическая медицина.* 2021. Т. 24, № 6. С. 85–89. [Dadaeva VA, Korolev AI, Fedorovich AA, et al. The condition of the vascular wall in overweight and obese men. *The Russian Journal of Preventive Medicine.* 2021;24(6):85–89. (In Russ.)]. Doi: 10.17116/profmed20212406185.

36. Vasilieva ME, Kashchenko VA, Shmidt EV, et al. Improvement of microvascular function in patients with morbid obesity after bariatric surgery revealed by imaging photoplethysmography. *Obes Surg.* 2025;35(3):1001–1008. Doi: 10.1007/s11695-025-07741-8.

37. Lanka P, Segala A, Farina A, et al. Non-invasive investigation of adipose tissue by time domain diffuse optical spectroscopy. *Biomed Opt Express.* 2020;11(5):2779–2793. Doi: 10.1364/BOE.391028.

38. Boonya-Ananta T, Rodriguez AJ, Ajmal A, et al. Synthetic photoplethysmography (PPG) of the radial artery through parallelized Monte Carlo and its correlation to body mass index (BMI). *Sci Rep.* 2021;11(1):2570. Doi: 10.1038/s41598-021-82124-4.

39. Rodriguez AJ, Boonya-Ananta MT, Gonzalez M, et al. Skin optical properties in the obese and their relation to body mass index: a review. *J Biomed Opt.* 2022;27(3):030902. Doi: 10.1117/1.JBO.27.3.030902.

Информация об авторах

Трунов Илья Владимирович – аспирант, Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва, Россия, e-mail: ilya_trunov_90@mail.ru, ORCID: 0009-0007-9647-1702.

Федорович Андрей Александрович – канд. мед. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Микроциркуляции и регионарного кровообращения», Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва, Россия; старший научный сотрудник лаборатории «Вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы», Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия, e-mail: faa-micro@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5140-568X.

Королев Андрей Игоревич – канд. мед. наук, руководитель лаборатории «Микроциркуляции и регионарного кровообращения», Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва, Россия, e-mail: dr.korolev.andrei@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9830-8959.

Осоков Виталий Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории «Микроциркуляции и регионарного кровообращения», Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва, Россия, e-mail: vip.ososkov11@gmail.com, ORCID: 0009-0005-9678-1378.

Драпкина Оксана Михайловна – д-р мед. наук, профессор, академик РАН, директор, Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва, Россия, e-mail: ODrapkina@gnicpm.ru, ORCID: 0000-0002-4453-8430.

Authors information

Trunov Ilya V. – PhD Student, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia, e-mail: ilya_trunov_90@mail.ru, ORCID: 0009-0007-9647-1702.

Fedorovich Andrey A. – Candidate (PhD) of Sciences in Medicine, Senior Researcher, Laboratory of Microcirculation and Regional Circulation, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine; Senior Researcher, Laboratory of Autonomic Regulation of Cardiovascular System, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: faa-micro@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5140-568X.

Korolev Andrey I. – Candidate (PhD) of Sciences in Medicine, Head, Laboratory of Microcirculation and Regional Circulation, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia, e-mail: dr.korolev.andrei@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9830-8959.

Ososkov Vitaly S. – Junior Researcher, Laboratory of Microcirculation and Regional Circulation, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia, e-mail: vip.ososkov11@gmail.com, ORCID: 0009-0005-9678-1378.

Drapkina Oksana M. – Doctor of Medical Sciences, Professor, Member of the Russian Academy of Science; Director, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia, e-mail: ODrapkina@gnicpm.ru, ORCID: 0000-0002-4453-8430.