

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco634472>

Особенности микроциркуляции крови в различных возрастных группах населения в зависимости от состояния урбоэкосистем

А.В. Дерюгина, Д.А. Данилова, Ю.А. Старателева, М.Н. Таламанова

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Неблагоприятное воздействие факторов окружающей среды, как экологических, так и обусловленных проживанием в урбанизированной густонаселённой среде, определяет развитие мер по защите здоровья населения. Гемодинамика микроциркуляторного русла играет значительную роль в поддержании тканевого гомеостаза, а нарушения морфофункциональных характеристик выявляются в большинстве случаев различных заболеваний. При этом на сегодняшний день не исследована динамика изменения микроциркуляции с возрастом в зависимости от проживания человека в различных урбанизированных экосистемах.

Цель. Изучить характер изменений микроциркуляторного русла в разных возрастных группах населения в зависимости от состояния урбоэкосистем, включая мегаполис и малый туристический город без выраженной промышленности.

Материал и методы. В исследовании принимали участие добровольцы из Нижнего Новгорода (мегаполиса с развитой промышленностью) и Семёнова (малого туристического города без выраженной промышленности). Добровольцы из данных населённых пунктов, различных по уровню антропогенной нагрузки и экологическому состоянию, были разделены на 3 возрастные группы: 1-я — 18–44 года; 2-я — 45–59 лет; 3-я — 60–74 года. Исследование микроциркуляции проводили методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с помощью лазерного анализатора капиллярного кровотока «ЛАЗМА СТ» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия). Оценивали амплитудно-частотные характеристики с вейвлет-анализом осцилляций кровотока.

Результаты. При сравнении амплитудно-частотных характеристик микроциркуляции 1-й группы мегаполиса и малого туристического города с невыраженной промышленностью не выявлено значительных различий. При этом анализ амплитудно-частотного спектра 2-й и 3-й групп выявил изменения реактивности структур микроциркуляторного русла в зависимости от возраста, которые носили определённые различия в зависимости от урбоэкосистемы. Межгрупповые различия в зависимости от урбоэкосистем регистрировали по значениям амплитуд эндотелиального ритма (Аэ), нейрогенного ритма (Ан), миогенным колебаниям (Ам) и амплитуде сердечного ритма (Ас). Когорта мегаполиса характеризовалась снижением Ан, Ам, Ас и увеличением Аэ во 2-й и 3-й группах. В когорте населения малого города изменение Ам не регистрировалось, тогда как было более выражено снижение Аэ и Ас во 2-й группе при последующем возрастании в 3-й возрастной группе Аэ, Ан, Ам и дальнейшем снижении Ас по сравнению с 1-й и 2-й возрастными группами. Показатель, характеризующий мощность притока крови в микроциркуляторное русло, уменьшался в 3-й возрастной группе мегаполиса.

Заключение. Анализ микроциркуляции методом ЛДФ позволил выявить включение различных механизмов регуляции микроциркуляции в зависимости состояния урбоэкосистем с наличием риска снижения адаптационных возможностей организма с увеличением возраста и при проживании в мегаполисе. Результаты исследования могут быть использованы для разработки мер по профилактике недостаточности тканевой перфузии в условиях различных урбоэкосистем.

Ключевые слова: урбоэкосистема; микроциркуляция; возраст; адаптация.

Как цитировать:

Дерюгина А.В., Данилова Д.А., Старателева Ю.А., Таламанова М.Н. Особенности микроциркуляции крови в различных возрастных группах населения в зависимости от состояния урбоэкосистем // Экология человека. 2024. Т. 31, № 3. С. 200–209. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco634472>

Рукопись поступила: 21.07.2024

Рукопись одобрена: 18.09.2024

Опубликована online: 27.09.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco634472>

Features of blood microcirculation across different age groups in relation to urban ecosystem conditions

Anna V. Deryugina, Darya D. Danilova, Yulia A. Starateleva, Maria N. Talamanova

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Understanding adverse effects of environmental factors, including those associated with urbanization and high population density, are important for development of public health protection measures. The hemodynamics of the microcirculatory system plays a significant role in maintaining tissue homeostasis, with morphofunctional characteristics often present in most cases of diseases. However, there remains a lack of comprehensive research on the aging process and the effects of residing in different urban settings on microcirculation dynamics.

AIM: To study the changes in the microcirculatory system across different age groups, depending on the state of urban ecosystems, including a megalopolis and a small tourist city without significant industrial activity.

MATERIAL AND METHODS: The study involved volunteers from the industrial megalopolis of Nizhny Novgorod and the city of Semenov, a small tourist town without significant industrial activity. Volunteers from different areas, varying in terms of human activity and environmental conditions, were divided into three age groups: group 1: 18–44 years old, group 2: 45–59 years old, and group 3: 60–74 years old. Microcirculation was measured by laser Doppler flowmetry (LDF) using a laser capillary blood flow analyzer "LAZMA ST" (NPP LAZMA LLC, Russia). The amplitude-frequency characteristics were evaluated with a wavelet analysis of blood flow oscillations.

RESULTS: A comparison of the amplitude-frequency characteristics (frequency response) of microcirculation between the 1st group of a megalopolis and a small tourist city with minimal industrial activity did not reveal any significant differences. However, upon further analysis of the amplitude-frequency spectrum of groups 2 and 3, changes in the reactivity of microcirculatory structures were observed, depending on age and urban environment. Inter-group differences based on urban ecosystems were identified through variations in endothelial rhythm amplitudes (Ae), neurogenic rhythm (An), myogenic oscillations (Am), and heart rate amplitude (Ah). The megalopolis group exhibited a decrease in An, Am, and Ah, along with an increase in Ae in groups 2 and 3. In contrast, the small city population showed a decrease in Ae, An, and As in group 2, followed by an increase in Ae, An, Am in group 3, and a further decrease in As compared to age groups 1 and 2. Furthermore, the indicator reflecting the power of blood flow into the microcirculatory bed decreased in the 3rd age group of the megalopolis.

CONCLUSION: The analysis of microcirculation using the LDF method allows to identify the involvement of various mechanisms regulating microcirculation, depending on the condition of the agro-ecosystem and the presence of risk factors that reduce adaptive capacity with age and living in a megalopolis. The findings from this study can be used to develop measures to prevent tissue perfusion insufficiency in different urban environments.

Keywords: urban ecosystem; microcirculation; age; adaptation.

To cite this article:

Deryugina AV, Danilova DD, Starateleva YuA, Talamanova MN. Features of blood microcirculation across different age groups in relation to urban ecosystem conditions. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2024;31(3):200–209. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco634472>

Received: 21.07.2024

Accepted: 18.09.2024

Published online: 27.09.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco634472>

血液微循环在不同年龄组的人口取决于城市生态系统的状态的特点

Anna V. Deryugina, Darya D. Danilova, Yulia A. Starateleva, Maria N. Talamanova

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

摘要

理由。 环境因素的不利影响，无论是环境还是生活在城市化人口稠密的环境中造成的因素，都决定了保护公众健康的措施的制定。微循环床的血流动力学在维持组织稳态中起着重要作用，并且在各种疾病的大多数情况下检测到形态功能特征的违反。与此同时，迄今为止，尚未研究微循环随年龄变化的动态，这取决于人类在各种城市化生态系统中的居住情况。

目标。 研究不同年龄组人口微循环床变化的性质，取决于城市生态系统的状态，包括一个特大城市和一个没有明显工业的小型旅游城市。

材料和方法。 这项研究涉及来自下诺夫哥罗德（一个拥有发达工业的特大城市）和 Semenov（一个没有明显工业的小型旅游城市）的志愿者。来自这些定居点的志愿者在人为负荷和环境条件方面有所不同，分为3个年龄组：1—18~44岁；2—45~59岁，3—60~74岁。使用激光毛细管血流分析仪“LAZMA ST”（NPP LAZMA LLC, Russia）通过激光多普勒血流仪（LDF）研究微循环。用血流振荡的小波分析评价了振幅-频率特性。

结果。 在比较第一组特大城市和一个小型旅游城市的微循环幅频特性时，没有发现显著差异。通过对第二组和第三组幅频谱的分析，发现微循环床结构的反应性随年龄的不同而发生变化，而微循环床结构的反应性随城市生态系统的不同而存在一定的差异。通过内皮节律振幅（Ae），神经源性节律（An），肌源性振荡（Am）和心率振幅（Ac）的值记录了取决于城市生态系统的组间差异。特大城市队列的特征在于Ah, Am, As的减少以及第2组和第3组Ae的增加。在一个小城市的人群中，Am没有变化，而Ae和As在第二组中有更明显的减少，其次是第三年龄组的Ae, An, Am增加，与第一和第二年龄组相比进一步减少。表征进入微循环床的血流功率的指标在特大城市的第三年龄组中下降。

结论。 通过LDF方法对微循环的分析，可以确定包括各种调节微循环的机制，这取决于城市生态系统的状态，随着年龄的增长和生活在特大城市时，身体的适应能力会降低。该研究结果可用于制定预防各种城市生态系统中组织灌注不全的措施。

关键词：城市生态系统；微循环；年龄；适应。

引用本文：

Deryugina AV, Danilova DD, Starateleva YuA, Talamanova MN. 血液微循环在不同年龄组的人口取决于城市生态系统的状态的特点. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2024;31(3):200–209. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco634472>

收到: 21.07.2024

接受: 18.09.2024

发布日期: 27.09.2024

ОБОСНОВАНИЕ

Неблагоприятное воздействие факторов окружающей среды базируется на уровне химического, физического и биологического загрязнения, что определяет приоритеты мер по защите здоровья населения [1]. Кроме экологических проблем, на состояние здоровья человека оказывают влияние факторы проживания в урбанизированной среде с высокой плотностью застройки, заселения, давления временного фактора, повышенной частоты вынужденных социальных контактов (общественный транспорт, метро), нарушение персонального пространства, затруднённая достижимость зон отдыха. Всё перечисленное характерно для мегаполисов и определяет развитие не только стрессов, роста неврозов, но и соматических заболеваний [2, 3]. Исследование показателей гомеостаза организма населения различных по состоянию урбозкосистем позволяет провести сравнительный анализ адаптационных приспособительных реакций в зависимости от экологических аспектов. В качестве прогностических и диагностических критериев в оценке общего функционального состояния организма целесообразно использовать параметры микроциркуляции, поскольку изменения в системе микроциркуляции крови коррелируют со сдвигами в центральной гемодинамике [4]. Кроме того, кровоток в микроциркуляторном русле подвержен колебаниям, которые отражают текущее функциональное состояние систем его регуляции [5]. В свою очередь, гемодинамика микроциркуляторного русла играет значительную роль в поддержании тканевого гомеостаза, а её изменения сопровождаются различными патологическими процессами [6]. Показано, что большое число заболеваний связано с теми или иными нарушениями отдельных звеньев микроциркуляции [7]. Микроциркуляторное русло состоит из артериол, венул и капилляров, которые регулируют микрососудистый кровоток эритроцитов для оптимального обеспечения тканей кислородом [8]. Для оценки микроциркуляторной перфузии в последние два десятилетия всё чаще используют лазерные методы [9]. Анализ амплитудно-частотного спектра позволяет изолированно оценивать вклад каждого звена микроциркуляции, принимающего участие в модуляции кровотока на уровне микрососудов [7]. При этом к активным факторам контроля микроциркуляции относят эндотелиальный, миогенный и нейрогенный механизмы регуляции просвета сосудов, определяющие поток крови со стороны сосудистой стенки, к пассивным осцилляциям относят дыхательные и сердечные механизмы, формирующиеся вне микроциркуляторного русла [10]. В результате взаимодействия активных и пассивных механизмов вырабатываются оптимальные гемодинамические параметры для транскапиллярного обмена [5]. Однако на сегодняшний день нет исследований того, как происходит изменение микроциркуляции в зависимости от проживания человека в экологически

загрязнённом мегаполисе и в малом городе с малым количеством промышленных предприятий. Представляет интерес анализ развивающихся процессов приспособления организма на уровне микроциркуляции в зависимости от состояния урбозкосистем. Данное направление исследований целесообразно с точки зрения раскрытия механизмов адаптации организма к различным условиям существования, кроме того, позволяет выявить возможные точки срыва адаптационных возможностей организма для разработки методов своевременной коррекции здоровья населения.

Цель исследования. Изучение амплитудно-частотных характеристик микроциркуляции разных возрастных групп населения в зависимости от состояния урбозкосистем, включая мегаполис и малый туристический город без выраженной промышленности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Аналитическое поперечное исследование случайной выборки.

Критерии соответствия

В исследование включены добровольцы, соответствующие плану исследования (возраст, проживание на территории исследуемого региона не менее пяти лет). У всех испытуемых не было системных или периферических сосудистых заболеваний, заболеваний соединительной ткани и дерматоза.

Из исследования были исключены добровольцы с вредными привычками, ожирением, психическими расстройствами и расстройствами поведения, беременностью.

Условия проведения

Исследование проводили на базе Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Продолжительность исследования

Всем участникам исследования провели однократную регистрацию параметров микроциркуляции крови в коже при помощи лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), которую осуществляли лазерным анализатором капиллярного кровотока «ЛАЗМА СТ» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия), позволяющим проводить комплексную оценку микроциркуляции.

Описание медицинского вмешательства

ЛДФ-грамму записывали в первой половине дня в помещении с естественным освещением и температурой 21–22 °С. Обследуемые находились в положении сидя. После их 20-минутной акклиматизации в спокойном состоянии на кожу дистальных фаланг II пальцев кистей обеих рук фиксировали оптический волоконный зонд.

Установку зонда осуществляли без сдавления кожи. Запись сигнала выполняли в течение 5 мин.

Основной исход исследования

Оценивали амплитудно-частотные характеристики отражённого сигнала. Для их расчёта использовали вейвлет-анализ осцилляций кровотока. Амплитуды эндотелиального, нейрогенного, миогенного, венолярного и сердечного ритмов оценивали по максимальным значениям осцилляций кровотока (A_{\max} , пф. ед) в соответствующих частотных диапазонах.

Сумму (ΣA_{\max}) в эндотелиальном, нейрогенном, миогенном и сердечном частотных диапазонах расценивали как мощность механизмов, обеспечивающих приток крови в микроциркуляторное русло по формуле [11]:

$$\Sigma A_{\max} = A_{\text{э}} + A_{\text{н}} + A_{\text{м}} + A_{\text{с}},$$

где $A_{\text{э}}$ — амплитуды колебаний перфузии в эндотелиальном диапазоне, $A_{\text{н}}$ — амплитуды колебаний перфузии в нейрогенном диапазоне, $A_{\text{м}}$ — амплитуды колебаний перфузии в миогенном диапазоне, $A_{\text{с}}$ — амплитуды колебаний перфузии в сердечном диапазоне.

Анализ в группах

В исследовании принимали участие 60 добровольцев из Нижнего Новгорода (мегаполиса с развитой промышленностью) и 60 добровольцев из Семёнова (малого туристического города без выраженной промышленности). Все обследуемые были информированы и дали согласие на включение в исследование. Согласно классификации ВОЗ, обе выборки были подразделены на 3 возрастные группы: 1-я — 18–44 года; 2-я — 45–59 лет; 3-я — 60–74 года. Каждая группа включала по 20 человек и была сопоставима по полу и соматометрическим показателям (табл. 1).

Методы регистрации исходов

Регистрацию показателей ЛДФ осуществляли с помощью лазерного анализатора капиллярного кровотока «ЛАЗМА СТ» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия), позволяющего проводить комплексную оценку микроциркуляции.

Этическая экспертиза

Протокол исследования не проходил рассмотрение и не был одобрен этическим комитетом. Каждый респондент дал добровольное письменное согласие на обработку персональных данных в ходе исследования.

Статистический анализ

Полученные экспериментальные данные обработаны с помощью пакетов прикладных программ Statistica 6.0 и Microsoft Excel с использованием методов одномерной статистики. Результаты представлены в виде $M \pm SEM$, где M — среднее арифметическое, SEM — стандартная ошибка среднего. Для проверки гипотезы о виде распределения применяли метод Шапиро–Уилка. Статистические закономерности изучали с применением параметрического (критерий Стьюдента с поправкой Бонферрони) метода статистики. Различия считали статистически значимыми при уровне значимости $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты исследования

Группу условно здоровых добровольцев составили мужчины и женщины 18–74 лет из двух населённых пунктов (60 добровольцев из Нижнего Новгорода и 60 добровольцев из Семёнова), которые были разделены в каждой выборке на три возрастные группы по 20 человек: 1-я — 18–44 года; 2-я — 45–59 лет; 3-я — 60–74 года. Соотношение лиц мужского и женского пола было примерно одинаковым. Жители Нижнего Новгорода — 33 (55%) мужчины и 27 (45%) женщин в возрасте от 18 до 72 лет; жители Семёнова — 32 (54%) мужчины и 28 (46%) женщин в возрасте от 18 до 74 лет.

Основные результаты исследования

Анализ амплитудно-частотных показателей микроциркуляции населения мегаполиса показал, что во 2-й возрастной группе значения амплитуды эндотелиального ритма увеличились на 52%, тогда как в 3-й группе данный

Таблица 1. Соматометрическая, половая и возрастная характеристика добровольцев исследуемых выборок

Table 1. The somatometric, gender, and age characteristics of the volunteers in the studied samples

Группа Group	Пол (м/ж), % Gender (M/F), %	Возраст, лет Age (years)	ИМТ, кг/м ² BMI (kg/m ²)	Рост, см Height (cm)
1-я выборка (добровольцы из Нижнего Новгорода) 1 sample (volunteers from Nizhny Novgorod)				
1	50/50	29,5±2,2	26,1±1,3	173,4±6,7
2	57/43	49,5±2,8	27,5±2,3	169,4±9,3
3	56/44	65,5±2,0	25,8±1,9	163,2±10,5
2-я выборка (добровольцы из Семёнова) 2 sample (volunteers from Semenov)				
1	50/50	31,5±4,5	25,3±1,8	175,4±10,2
2	55/45	48,8±3,6	26,9±2,6	171,8±7,9
3	55/45	64,7±5,1	26,2±1,6	166,4±8,6

показатель уменьшился на 28% относительно значений 2-й группы. Амплитуда нейрогенных колебаний значительно уменьшилась как во 2-й, так и в 3-й группе на 16% и 39% относительно значений 1-й группы соответственно. Амплитуда миогенных колебаний во 2-й группе снизилась на 28% и в 3-й группе — на 42% относительно значений 1-й группы. Значения показателя веноулярного ритма были сопоставимы во всех группах. Значения амплитуды кардиоритма уменьшились на 38% во 2-й группе и на 27% — в 3-й группе относительно значений 1-й группы (табл. 2).

Результаты спектрального анализа колебаний микрокровотока у добровольцев малого туристического города показали снижение амплитуд эндотелиального, нейрогенного и сердечного компонентов во 2-й группе на 36%, 37% и 33% соответственно относительно показателей 1-й группы (табл. 3). В 3-й группе регистрировался рост амплитуд колебаний кровотока в эндотелиальном, нейрогенном

и миогенном спектрах флуксуций относительно 1-й и 2-й групп с дальнейшим снижением кардиального ритма.

Таким образом, при сравнении осцилляций кровотока у добровольцев малого туристического города с невыраженной промышленностью и мегаполиса не выявлено значимых различий показателей в 1-й возрастной группе, тогда как динамика изменений амплитудно-частотных характеристик микроциркуляции от 1-й к 3-й возрастной группе между данными выборками населения носила различный характер. Межгрупповые различия в аналогичных возрастных когортах мегаполиса и малого города показали, что между группами с возрастом 45–59 лет (2-я группа) регистрировались выраженные различия по значениям амплитуд эндотелиального ритма и миогенным колебаниям при однонаправленном снижении амплитуд нейрогенного и сердечного компонентов. В группе 60–74 года (3-я группа) между двумя исследуемыми

Таблица 2. Амплитудно-частотные характеристики микроциркуляции в разных возрастных группах населения мегаполиса

Table 2. Amplitude-frequency characteristics of microcirculation in different age groups in the megalopolis

Показатель Indicator	Исследуемая группа Study group		
	1	2	3
Аэ, пф. ед Ae, perfusion units	0,88±0,19	1,34±0,22*	1,24±0,17*
Ан, пф. ед An, perfusion units	0,93±0,10	0,78±0,11*	0,57±0,10**
Ам, пф. ед Am, perfusion units	0,78±0,11	0,56±0,10*	0,46±0,06*
Ав, пф. ед Av, perfusion units	0,34±0,03	0,35±0,06	0,38±0,10
Ас, пф. ед Ac, perfusion units	1,54±0,06	1,06±0,08*	1,13±0,07*

Примечание: Аэ — амплитуда эндотелиального ритма; Ан — амплитуда нейрогенного ритма; Ам — амплитуда миогенного ритма; Ав — амплитуда веноулярного ритма; Ас — амплитуда сердечного ритма. * $p < 0,05$ — статистическая значимость по отношению к 1-й группе; ** $p < 0,05$ — статистическая значимость показателей 3-й группы ко 2-й группе.

Note: Ae is the amplitude of the endothelial rhythm; An is the amplitude of the neurogenic rhythm; Am is the amplitude of the myogenic rhythm; Av is the amplitude of the venular rhythm; Ac is the amplitude of the cardiac rhythm. * $p < 0.05$, statistically significant difference compared to group 1; ** $p < 0.05$, statistically significant difference between indicators of group 3 and group 2.

Таблица 3. Амплитудно-частотные характеристики микроциркуляции в разных возрастных группах населения малого туристического города

Table 3. Amplitude-frequency characteristics of microcirculation in different age groups in the small tourist town

Показатель Indicator	Исследуемая группа Study group		
	1	2	3
Аэ, пф. ед Ae, perfusion units	1,01±0,46	0,65±0,08*	1,46±0,09**
Ан, пф. ед An, perfusion units	1,14±0,27	0,72±0,14*	1,38±0,12**
Ам, пф. ед Am, perfusion units	0,81±0,07	1,03±0,28	1,14±0,14*
Ав, пф. ед Av, perfusion units	0,39±0,08	0,42±0,11	0,47±0,14
Ас, пф. ед Ac, perfusion units	1,46±0,17	0,96±0,11*	0,89±0,09*

Примечание: Аэ — амплитуда эндотелиального ритма; Ан — амплитуда нейрогенного ритма; Ам — амплитуда миогенного ритма; Ав — амплитуда веноулярного ритма; Ас — амплитуда сердечного ритма. * $p < 0,05$ — статистическая значимость по отношению к 1-й группе; ** $p < 0,05$ — статистическая значимость показателей 3-й группы ко 2-й группе.

Note: Ae is the amplitude of the endothelial rhythm; An is the amplitude of the neurogenic rhythm; Am is the amplitude of the myogenic rhythm; Av is the amplitude of the venular rhythm; Ac is the amplitude of the cardiac rhythm. * $p < 0.05$, statistically significant difference compared to group 1; ** $p < 0.05$, significant difference between indicators of group 3 and group 2.

Таблица 4. Показатель мощности притока крови в разных возрастных группах населения мегаполиса и малого туристического города
Table 4. An indicator of the blood flow rate in different age groups of the population in the megalopolis and the small tourist town

Показатель Indicator	Исследуемая группа Study group		
	1	2	3
ΣA_{\max} пф.ед			
Мегаполис Megalopolis	4,14± 0,31	3,74± 0,51	3,40± 0,42*
Малый город Small tourist town	4,41± 0,48	3,36± 0,59	4,87± 0,38**

* $p < 0,05$ — статистическая значимость по отношению к 1-й группе; ** $p < 0,05$ — статистическая значимость показателей 3-й группы ко 2-й группе.

* $p < 0,05$, statistically significant difference compared to group 1; ** $p < 0,05$, significant difference between indicators of group 3 and group 2.

выборками сохранялось однонаправленное изменение амплитуды сердечного компонента, которая характеризовалась снижением показателя, что сопровождалось ростом эндотелиального компонента в обеих выборках и разнонаправленным изменением амплитуд нейрогенного и миогенного ритмов.

Показатель, характеризующий мощность притока крови в микроциркуляторное русло, уменьшался в 3-й возрастной группе мегаполиса. У когорты населения малого города наблюдалась тенденция к снижению показателя во 2-й возрастной группе с последующим восстановлением в 3-й группе до уровня 1-й возрастной группы (табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты спектрального анализа свидетельствуют о разных механизмах регуляции кровотока на уровне микроциркуляции в различных урбанизированных экосистемах. При этом с возрастом, как в мегаполисе, так и в малом туристическом городе, повышается выраженность активных механизмов регуляции, таких факторов контроля, как эндотелиальный, нейрогенный и миогенный. Природа нейрогенного тонуса связана с активностью адренорецепторов и отчасти гладкомышечными клетками.

Понижение амплитуды нейрогенных колебаний означает повышение нейрогенного тонуса, и наоборот. Понижение амплитуды миогенных колебаний означает повышение миогенного тонуса, и наоборот [12]. Следовательно, снижение данных компонентов у обследуемых 2-й и 3-й групп мегаполиса определяется повышением миогенного и нейрогенного тонуса и свидетельствует о вазоконстрикции сосудов, которая усиливается к 3-й группе, то есть с увеличением возраста обследуемых. Уменьшение вазомоторных амплитуд вызвано повышением мышечного сопротивления и, как следствие, определяет снижение нутритивного кровотока [13]. Следует отметить, что на этом фоне у жителей мегаполиса во 2-й и 3-й группах зарегистрировано увеличение амплитуды эндотелиального ритма, что сочеталось с противоположной амплитудой сердечного ритма, которая уменьшалась во 2-й и 3-й возрастных группах по отношению к 1-й группе. Полученные данные свидетельствуют о повышении функциональной

активности эндотелия, что связано с релаксирующим фактором оксида азота [14], тогда как величина сердечного ритма позволяет косвенно судить о величине просвета и, соответственно, тонусе крупных артериол [4]. Поскольку диагностическое значение эндотелиальных колебаний заключается в оценке эндотелиальной дисфункции [15] и считается, что дисфункцию эндотелия можно рассматривать как одно из основных клеточных событий, ответственных за гемодинамический коллапс, наблюдаемый при состояниях шока [16], и именно она связана с нарушением барьерной функции сосудов [17], вероятно, выявленный рост амплитуды эндотелиального ритма является компенсаторным механизмом, направленным на повышение перфузии на фоне повышения тонуса сосудов и уменьшения вследствие этого притока крови в микрососудистое русло, в противном случае увеличение тонуса резистивных сосудов и выраженная активация симпатических вазомоторных волокон могли бы уменьшить эффективность микрогемодинамики [18]. Этот факт подтверждает выявленное снижение показателя мощности притока крови в микрососуды с возрастом в выборке обследуемых мегаполиса.

В свою очередь, у жителей малого города при старении отмечено увеличение амплитуд эндотелиального ритма, миогенных и нейрогенных колебаний в 3-й возрастной группе, что свидетельствует не только об увеличении эндотелий-зависимой вазодилатации, выявленной у жителей мегаполиса, но и об уменьшении активности адренорецепторов, снижении тонуса гладкомышечных клеток и отсутствии признаков спазмирования артериол. Данная направленность механизмов регуляции кровотока сопровождается увеличением мощности притока крови в микроциркуляцию.

Ограничения исследования

Ограничения исследования связаны с анализом механизмов регуляции только микрогемодинамики функционирования сердечно-сосудистой системы в зависимости от влияния условий урбанизированной среды и экологических факторов. В этой связи планируется дальнейшее исследование прогностических и диагностических критериев центральной гемодинамики и выявление её

корреляционной зависимости от изменения параметров микроциркуляции в различных возрастных группах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характер изменений микроциркуляторного русла разных возрастных групп населения в зависимости от состояния урбозкосистем, включая мегаполис и малый туристический город без выраженной промышленности, свидетельствует о снижении амплитуды пассивных колебаний сердечного генеза с увеличением возраста обследуемых, указывая на снижение вклада внешних факторов управления флуксуциями кровотока. При этом происходит повышение нагрузки на активные звенья регуляции микроциркуляции, связанные с обеспечением и поддержанием микроперфузии тканей. Вазоконстрикция, вызванная повышением активности симпатического звена вегетативной нервной системы, регистрируется в обеих выборках во 2-й группе (45–59 лет) и усиливается при старении у жителей мегаполиса. В выборке добровольцев мегаполиса наблюдается увеличение амплитуды эндотелий-зависимых колебаний, что может указывать на повышение продукции основного вазодилататора — оксида азота. Однако данных механизмов регуляции, по всей видимости, оказывается недостаточно для обеспечения нормализации микроциркуляции при старении, о чём свидетельствует постепенное снижение мощности притока крови в микроциркуляторное русло от 1-й к 3-й группе у жителей мегаполиса. В популяции добровольцев малого туристического города в 3-й возрастной группе происходит дополнительное увеличение нейрогенных колебаний, что обеспечивает приток дополнительного объёма крови в систему микроциркуляции. Амплитуда миогенных колебаний, по величине которой оценивается работа прекапиллярных сфинктеров, и, косвенно, количество функционирующих капилляров, также увеличивается с возрастом в популяции добровольцев малого туристического города. На этом фоне повышается приток крови в микроциркуляцию, что, по всей видимости, показывает эффективность адаптационных процессов организма, которые, вероятно, обусловлены работой активных механизмов регуляции,

определяемых локальными физиологическими потребностями тканей организма.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.В. Дерюгина — разработка концепции и плана исследования, анализ данных и выводы; Д. А. Данилова — сбор и анализ данных; Ю.А. Старателева, М.Н. Таламанова — подготовка рукописи. 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).

Источник финансирования. Научное исследование проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание FSWR-2023-0032, 2023–2025).

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

Информированное согласие на участие в исследовании. Все участники до включения в исследование добровольно подписали форму информированного согласия, утверждённую в составе протокола исследования этическим комитетом.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. A.V. Deryugina — development of the concept and research plan, data analysis and conclusions; D.A. Danilova — data collection and analysis; Yu.A. Starateleva, M.N. Talamanova — preparation of the manuscript. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment FSWR-2023-0032, 2023–2025).

Competing interests. The authors declare no obvious or potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

Patients' consent. Written consent was obtained from all the study participants before the study initiation according to the study protocol approved by the local ethics committee.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревич Б.А. Экологические приоритеты и здоровье: социально уязвимые территории и группы населения // Экология человека. 2010. № 7. С. 3–9. EDN: MIVYKN
2. Филиппова О.Е., Щёголева Л.С., Шашкова Е.Ю., Добродеева Л.К. Иммунологическая реактивность у жительниц мегаполиса // Экология человека. 2021. Т. 28, № 1. С. 11–16. EDN: YNPPRD doi: 10.33396/1728-0869-2021-1-11-16
3. Розанов В.А., Лаская Д.А., Радионов Д.С., Руженкова В.В. Психосоциальный стресс, испытываемый современными студентами вузов, и его последствия: фактор мегаполиса // Экология человека. 2023. Т. 30, № 11. С. 805–820. EDN: DQOUPY doi: 10.17816/humeco622862
4. Чуян Е.Н., Ананченко М.Н. Индивидуально-типологические особенности процессов микроциркуляции: влияние низкоинтенсивного миллиметрового излучения // Учёные записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: Биология. Химия. 2009. Т. 22, № 4. С. 236–254. EDN: XHSMHR
5. Федорович А.А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2010. Т. 9, № 1. С. 49–60. EDN: MUHMTT doi: 10.24884/1682-6655-2010-9-1-49-60

6. Чуян Е.Н., Трибрат Н.С., Джелдубаева Э.Р. Изменение кожной микроциркуляции в ответ на воздействие низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона // Медицина труда и промышленная экология. 2020. Т. 60, № 9. С. 605–609. EDN: GRLLCE doi: 10.31089/1026-9428-2020-60-9-605-609
7. Бархатов И.В. Оценка системы микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии // Клиническая медицина. 2013. Т. 91, № 11. С. 21–27. EDN: RSHRQT
8. Guven G, Hilty M.P., Ince C. Microcirculation: physiology, pathophysiology, and clinical application // *Blood Purif.* 2020. Vol. 49, N 1-2. P. 143–150. doi: 10.1159/000503775
9. Roustit M, Cracowski J.L. Non-invasive assessment of skin microvascular function in humans: an insight into methods // *Microcirculation.* 2012. Vol. 19, N 1. P. 47–64. doi: 10.1111/j.1549-8719.2011.00129.x
10. Крупаткин А.И. Колебания кровотока — новый диагностический язык в исследовании микроциркуляции // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2014. Т. 13, № 1. С. 83–99. EDN: SAHYCN doi: 10.24884/1682-6655-2014-13-1-83-99
11. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. М.: Медицина, 2005. EDN: QLLIIZ
12. Бокерия О.Л., Куулар А.М. Оценка влияния низкоинтенсивных электромагнитных полей на эндотелиальную функцию у больных с хронической сердечной недостаточностью // Саратовский научно-медицинский журнал. 2014. Т. 10, № 1. С. 86–92. EDN: SJGXIZ
13. Чуян Е.Н., Раваева М.Ю., Трибрат Н.С. Низкоинтенсивное электромагнитное излучение миллиметрового диапазона: влияние на процессы микроциркуляции // Физика живого. 2008. Т. 16, № 1. С. 82–90. EDN: SCDABP
14. Kvandal P., Stefanovska A., Veber M., et al. Regulation of human cutaneous circulation evaluated by laser Doppler flowmetry, iontophoresis, and spectral analysis: importance of nitric oxide and prostaglandins // *Microvasc Res.* 2003. Vol. 65, N 3. P. 160–171. doi: 10.1016/s0026-2862(03)00006-2
15. Ince C., Mayeux P.R., Nguyen T., et al. The endothelium in sepsis // *Shock.* 2016. Vol. 45, N 3. P. 259–270. doi: 10.1097/SHK.0000000000000473
16. Guerci P., Ergin B., Uz Z., et al. Glycocalyx degradation is independent of vascular barrier permeability increase in nontraumatic hemorrhagic shock in rats // *Anesth Analg.* 2019. Vol. 129, N 2. P. 598–607. doi: 10.1213/ANE.0000000000003918
17. Jhanji S., Stirling S., Patel N., et al. The effect of increasing doses of norepinephrine on tissue oxygenation and microvascular flow in patients with septic shock // *Crit Care Med.* 2009. Vol. 37, N 6. P. 1961–1966. doi: 10.1097/CCM.0b013e3181a00a1c
18. Dubin A., Pozo M.O., Casabella C.A., et al. Increasing arterial blood pressure with norepinephrine does not improve microcirculatory blood flow: a prospective study // *Crit Care.* 2009. Vol. 13, N 3. P. R92. doi: 10.1186/cc7922

REFERENCES

1. Revich BA. Environmental priorities and public health: socially vulnerable territories and population groups. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2010;(7):3–9. EDN: MTVYKN
2. Philippova OE, Shchegoleva LS, Shashkova EYu, Dobrodeeva LK. Immunological reactivity in megapolis residents. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2021;28(1):11–16. EDN: YNPPRD doi: 10.33396/1728-0869-2021-1-11-16
3. Rozanov VA, Laskaja DA, Radionov DS, Ruzhenkova VV. Psychosocial stress and its consequences among modern university students: the megapolis factor. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2023;30(11):805–820. EDN: DQOUPY doi: 10.17816/humeco622862
4. Chuyan EN, Ananchenko MN. Individually-tipological features of processes of microblood circulation: influencing of lowintensity electromagnetic radiation of the millimetric range. *Scientific Notes of Taurida V. Vernadsky National University. Series: Biology, Chemistry.* 2009;22(4):236–254. (In Russ.) EDN: XHSMHR
5. Fedorovich AA. The functional state of regulatory mechanisms of the microcirculatory blood flow in normal conditions and in arterial hypertension according to laser doppler flowmetry. *Regional Blood Circulation and Microcirculation.* 2010;9(1):49–60. EDN: MUHMTT doi: 10.24884/1682-6655-2010-9-1-49-60
6. Chuyan EN, Tribрат NS, Dzheldubayeva ER. Changes in skin microcirculation in response to low-intensity electromagnetic radiation of the millimeter range. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology.* 2020;60(9):605–609. EDN: GRLLCE doi: 10.31089/1026-9428-2020-60-9-605-609
7. Barkhatov IV. Assessment of the microcirculation system by laser Doppler flowmetry. *Clinical Medicine (Russian Journal).* 2013;91(11):21–27. EDN: RSHRQT
8. Guven G, Hilty MP, Ince C. Microcirculation: physiology, pathophysiology, and clinical application. *Blood Purif.* 2020;49(1-2):143–150. doi: 10.1159/000503775
9. Roustit M, Cracowski JL. Non-invasive assessment of skin microvascular function in humans: an insight into methods. *Microcirculation.* 2012;19(1):47–64. doi: 10.1111/j.1549-8719.2011.00129.x
10. Krupatkin AI. Blood flow oscillations — new diagnostic language in microvascular research. *Regional Blood Circulation and Microcirculation.* 2014;13(1):83–99. EDN: SAHYCN doi: 10.24884/1682-6655-2014-13-1-83-99
11. Krupatkin AI, Sidorov VV. Laser Doppler Flowmetry of Blood Microcirculation. Moscow: Meditsina; 2005. (In Russ.) EDN: QLLIIZ
12. Bokeria OL, Kuular AM. Influence of low-intensity electromagnetic fields on endothelial function in patients with chronic heart failure. *Saratov Journal of Medical Scientific Research.* 2014;10(1):86–92. (In Russ.) EDN: SJGXIZ
13. Chuyan EN, Tribрат NS, Ravaeva MU. Change of processes of microcirculation at influence of lowintensity electromagnetic radiation of the millimetric range. *Physics of the Alive.* 2008;16(1):82–90. (In Russ.) EDN: SCDABP
14. Kvandal P, Stefanovska A, Veber M, et al. Regulation of human cutaneous circulation evaluated by laser Doppler flowmetry, iontophoresis, and spectral analysis: importance of nitric oxide and prostaglandins. *Microvasc Res.* 2003;65(3):160–171. doi: 10.1016/s0026-2862(03)00006-2
15. Ince C, Mayeux PR, Nguyen T, et al. The endothelium in sepsis. *Shock.* 2016;45(3):259–270. doi: 10.1097/SHK.0000000000000473
16. Guerci P, Ergin B, Uz Z, et al. Glycocalyx degradation is independent of vascular barrier permeability increase in nontraumatic

hemorrhagic shock in rats. *Anesth Analg.* 2019;129(2):598–607. doi: 10.1213/ANE.0000000000003918

17. Jhanji S, Stirling S, Patel N, et al. The effect of increasing doses of norepinephrine on tissue oxygenation and microvascular flow in patients with septic shock. *Crit Care Med.* 2009;37(6):1961–1966. doi: 10.1097/CCM.0b013e3181a00a1c

18. Dubin A, Pozo MO, Casabella CA, et al. Increasing arterial blood pressure with norepinephrine does not improve microcirculatory blood flow: a prospective study. *Crit Care.* 2009;13(3):R92. doi: 10.1186/cc7922

ОБ АВТОРАХ

***Данилова Дарья Андреевна;**

адрес: 603022, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, к. 1;
ORCID: 0000-0002-7511-5123;
eLibrary SPIN: 2939-0350;
e-mail: danilovad.a@mail.ru

Дерюгина Анна Вячеславовна;

ORCID: 0000-0001-8812-8559;
eLibrary SPIN: 7974-4600;
e-mail: derugina69@yandex.ru

Юлия Андреевна Старателева;

ORCID: 0009-0006-5234-5985;
eLibrary SPIN: 9728-1346;
e-mail: sua13@mail.ru

Мария Николаевна Таламанова;

ORCID: 0000-0003-0512-6940;
eLibrary SPIN: 6829-3131;
e-mail: manjatal@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Darya A. Danilova;**

address: 23, k. 1 Gagarin Avenue, Nizhny Novgorod, 603022, Russia;
ORCID: 0000-0002-7511-5123;
eLibrary SPIN: 2939-0350;
e-mail: danilovad.a@mail.ru

Anna V. Deryugina;

ORCID: 0000-0001-8812-8559;
eLibrary SPIN: 7974-4600;
e-mail: derugina69@yandex.ru

Yulia A. Starateleva;

ORCID: 0009-0006-5234-5985;
eLibrary SPIN: 9728-1346;
e-mail: sua13@mail.ru

Maria N. Talamanova;

ORCID: 0000-0003-0512-6940;
eLibrary SPIN: 6829-3131;
e-mail: manjatal@yandex.ru

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author