

Сравнительный анализ структурно-функциональных перестроек микроциркуляторного русла у жителей северо-восточного и северо-западного регионов России

С.И. Вдовенко, И.В. Аверьянова

ФГБУН Научно-исследовательский центр «Арктика» Дальневосточного отделения Российской академии наук, Магадан, Россия

Резюме. Введение. Целью данной работы было комплексное изучение региональных особенностей структурно-функциональной организации микроциркуляторного русла и особенностей его нейро-вегетативной регуляции у жителей различных климатогеографических зон Российской Федерации (Магадан, Мурманск) в сравнении с жителями городов средней полосы России (Ульяновск, Москва). **Материалы и методы.** В исследование были включены 299 обследуемых в возрасте 17–21 года мужского пола: 119 уроженцев северо-восточного региона России, 72 жителя северо-западного региона и 108 представителей средней полосы. У всех обследуемых в состоянии покоя проводился анализ основных показателей микроциркуляционного русла, сердечно-сосудистой системы, а также параметров variability сердечного ритма.

Результаты. У жителей северных регионов России выявлены существенные региональные различия в организации микроциркуляторного русла, свидетельствующие о формировании разных физиологических стратегий адаптации к хроническому холодовому воздействию. У обследованных из северо-восточного региона обнаружены признаки изоляционно-метаболического типа адаптации, проявляющиеся выраженной вазоконстрикцией (возрастание общего периферического сопротивления сосудов на +15–20% и тенденция к вазоконстрикторным перестройкам микроциркуляционного русла в целом), повышением основного обмена (на 10% от должных величин) и преобладанием парасимпатической регуляции. У жителей северо-западного региона преобладали реакции привыкания, характеризующиеся дилатацией микрососудов, симпатикотонией и повышенным уровнем оксида азота. В группе сравнения из средней полосы России продемонстрированы промежуточные показатели.

Заключение. Результаты исследования выявили региональные различия в организации микроциркуляторного русла, нейровегетативной регуляции и гемодинамике между жителями северо-запада и северо-востока России, отражающие разные адаптационные стратегии к холодовому фактору. У северо-восточной популяции преобладает изоляционно-метаболический тип адаптации, тогда как у северо-западной – механизм привыкания, что указывает на разнообразие физиологических ответов на хроническое холодовое воздействие.

Ключевые слова: микроциркуляция, variability сердечного ритма, север, Арктика, средняя полоса России

Для корреспонденции: Сергей Игоревич Вдовенко. E-mail: vdovenko.sergei@yandex.ru

Для цитирования: Вдовенко С.И., Аверьянова И.В. Сравнительный анализ структурно-функциональных перестроек микроциркуляторного русла у жителей северо-восточного и северо-западного регионов России. Клини. эксп. морфология. 2026;15(1):23–32. DOI: 10.31088/CEM2026.15.1.23-32.

Финансирование. Работа выполнена за счет бюджетного финансирования НИЦ «Арктика» ДВО РАН в рамках выполнения темы «Комплексные молекулярно-генетические и морфофункциональные детерминанты адаптационных перестроек в условиях Севера» (регистрационный номер 1025031800012-3-3.1.8).

Статья поступила 02.09.2025. Получена после рецензирования 07.10.2025. Принята в печать 10.12.2025.

Comparative analysis of structural and functional changes in the microcirculatory system in residents of the northeastern and northwestern regions of Russia

S.I. Vdovenko, I.V. Averyanova

Scientific Research Center "Arktika", Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia

Abstract. Introduction. The aim of the study was a comprehensive assessment of regional differences in the structural and functional organization of the microcirculatory bed and its neurovegetative regulation

in residents of northern climatic and geographic regions of the Russian Federation (Magadan and Murmansk) and in residents of central Russia (Ulyanovsk and Moscow).

Materials and methods. The study included 299 male subjects aged 17–21 years: 119 residents of the northeastern region of Russia, 72 representatives of the northwestern region, and 108 participants of central Russia. The parameters were assessed when the subjects were at rest in a sitting position. The main indicators of the microcirculation were analyzed with capillaroscopy (Capillaroscan-1), whereas the indicators of the cardiovascular system and heart rate variability were measured using the VARICARD-KARDi software.

Results. We revealed significant regional differences in the organization of the microcirculatory bed among residents of the northern regions of Russia, indicating the formation of various physiological strategies for adaptation to chronic cold exposure. The patients from the northeastern region showed signs of an isolation-related metabolic adaptation, which manifested in pronounced vasoconstriction (an increase in total peripheral vascular resistance by +15–20% and a tendency to nocturnal restructuring of the microcirculation in general), an increase in basal metabolism (by 10% of the normal values), and predominance of parasympathetic regulation. In contrast, addictive reactions characterized by microvascular dilation, sympathicotonia, and elevated nitric oxide levels prevailed in the residents of the northwestern region. The control group from central Russia demonstrated intermediate indicators.

Conclusion. There are regional differences in the organization of the microcirculatory bed, autonomic regulation, and hemodynamics among residents of the northwestern and northeastern regions of Russia indicative of different adaptive strategies to cold exposure. The northeastern population predominantly exhibits an adaptation pattern of an isolation-induced metabolic type, whereas the northwestern population demonstrates a tendency toward a habituation response, indicating a diverse range of physiological adaptations to chronic cold exposure conditions.

Keywords: microcirculation, heart rate variability, north, Arctic, central Russia

Corresponding author: Sergei I. Vdovenko. E-mail: vdovenko.sergei@yandex.ru

For citation: Vdovenko S.I., Averyanova I.V. Comparative analysis of structural and functional changes in the microcirculatory system in residents of the northeastern and northwestern regions of Russia. *Clin. exp. morphology.* 2026;15(1)23–32 (In Russ.). DOI: 10.31088/CEM2026.15.1.23-32.

Funding. The work was carried out at the expense of budget funding from the Scientific Research Center "Arktika", Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences as part of the project "Complex Molecular Genetic and Morphological Determinants of Adaptive Reorganizations in the North" (registration number 1025031800012-3-3.1.8).

Received 02.09.2025. **Received in revised form** 07.10.2025. **Accepted** 10.12.2025.

Введение

В свете стратегических приоритетов Российской Федерации по освоению арктического региона изучение физиологических механизмов адаптации человека к жизни в экстремальных климатогеографических условиях высоких широт приобретает особую научную и практическую значимость. Обоснование стратегий приспособления необходимо для минимизации негативных последствий воздействия экстремальных факторов среды на организм, что имеет ключевое значение для обеспечения работоспособности и здоровья населения в условиях реализации государственных программ развития данного региона [1]. Микроциркуляторное русло выполняет важные физиологические функции, в том числе регуляцию системного артериального давления, обеспечение тканевой перфузии, транспорт метаболитов и газов, а также участие в терморегуляторных процессах [2].

В условиях холода люди поддерживают тепловой баланс за счет поведенческих и физиологических изменений [3]. Существуют три паттерна физиологических изменений: привыкание, метаболическая акклиматизация

и изоляционная акклиматизация. Привыкание вызывает ослабление вазоконстрикторной и дрожательной реакции, метаболическая акклиматизация приводит к увеличению метаболического производства тепла, а изоляционные перестройки вызывают усиление вазоконстрикторной реакции на холодное воздействие. По мнению [4], тип реакции акклиматизации зависит от вида и тяжести хронического холодного воздействия. В работе J.W. Castellani, A.J. Young [3] физиологические изменения в ответ на хроническое холодное воздействие рассматриваются не как различные типы акклиматизации, а как фазы в прогрессивном развитии полной адаптации.

Несмотря на принадлежность к единой географической зоне, северо-восточный и северо-западный регионы России характеризуются выраженной климатической гетерогенностью, обусловленной не только широтной зональностью, но и комплексом факторов, включающим атмосферную циркуляцию, континентальность климата и фотопериодические особенности, что должно сказываться на процессах адаптации к различным условиям существования [5].

Настоящее исследование направлено на комплексное изучение региональных особенностей структурно-функциональной организации микроциркуляторного русла и особенностей его нейровегетативной регуляции у жителей различных климатогеографических зон Российской Федерации (Магадан как представитель северо-востока страны, Мурманск – северо-запад) и в группе сравнения из средней полосы (Ульяновск, Москва, относящиеся к макрорегиону со сходным умеренно-континентальным климатом).

Материалы и методы

В рамках экспедиционных исследований в октябре–ноябре 2024 года был проведен комплексный анализ показателей микроциркуляторного русла, сердечно-сосудистой системы и вариабельности сердечного ритма у молодых представителей европеоидной популяции (1–3-е поколения проживания) из различных климатогеографических регионов России с целью оценки их функциональных резервов и адаптационных возможностей организма. Локации проведения научно-исследовательских работ: Магадан (северо-восточный регион), Мурманск (северо-западный регион) и умеренно-континентальная зона – Ульяновск, Москва.

В работе приняли участие 299 мужчин европеоидной популяции в возрасте 17–21 года. Выборка включала 119 человек из Магадана (19,5±0,2 года, индекс массы тела (ИМТ) 23,0±0,4 кг/м²), 72 жителя Мурманска (19,4±0,2 года, ИМТ 23,1±0,4 кг/м²) и 108 из Ульяновска и Москвы (19,7±0,3 года, ИМТ 23,1±0,5 кг/м²). Обследованные являлись уроженцами указанных регионов и студентами с регламентированной двигательной активностью в рамках учебного процесса.

Все участники подписали добровольное информированное согласие. Исследование проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации (2013) и одобрено на заседании локального этического комитета НИЦ «Арктика» ДВО РАН (протокол № 002/021 от 26.11.2021). Критерии включения: мужской пол, юношеский период онтогенеза, отсутствие хронических заболеваний в стадии обострения и жалоб на состояние здоровья, наличие информированного согласия. Все молодые люди, вошедшие в выборку, являлись постоянными жителями исследуемого региона.

Структурно-функциональная организация микроциркуляторного русла изучалась в области эпонихия (ногтевого валика) при помощи компьютерного видеокапилляроскопа «Капилляроскан-1» («Новые энергетические технологии», Россия). Все записи были сделаны в положении обследуемого сидя при комфортной температуре от 22 до 25°C, в первой половине дня, после 15-минутного отдыха, в положении руки на уровне сердца [6]. Проанализированы следующие морфологические показатели сосудов микроциркуляторного русла: диаметр артериального, венозного и переходного отделов капилляра, под которым понимается область сосуда, заполненная видимыми эритроцитами

(сами стенки сосудов практически неразличимы при световой микроскопии); длина капилляра; величина периваскулярной зоны, а именно ее линейный размер от максимально удаленной точки данной зоны до ближайшей точки переходного отдела капилляра [7].

Для регистрации показателей вариабельности сердечного ритма использовали комплекс «Варикард» (Институт внедрения новых медицинских технологий РАМЕНА, Россия) и программное обеспечение VARICARD-KARDi. У обследуемых регистрировали показатели вариабельности сердечного ритма во временной и частотной областях: MxDMn – разность между максимальным и минимальным значениями кардиоинтервалов, или вариационный размах; pNN50% – процент кардиоинтервалов, отличающихся от соседних более чем на 50 мс; Mo – наиболее часто встречающееся значение кардиоинтервала; RMSSD – квадратный корень из суммы разностей последовательного ряда кардиоинтервалов; SDNN – стандартное отклонение полного массива кардиоинтервалов; SI – стресс-индекс (индекс напряжения регуляторных систем).

Скорость потребления кислорода VO₂ определяли с помощью метабологафа «Спиrolан-М» («Ланамедика», Россия). Измерение артериального давления проводилось с использованием автоматического тонометра Nesei DS-1862 (Nihon Seimitsu Sokki Co., Япония). Регистрировались систолическое артериальное давление (САД), диастолическое артериальное давление (ДАД), а также частота сердечных сокращений (ЧСС), из которых рассчитывались следующие показатели: минутный объем кровообращения (МОК) и общее периферическое сопротивление (ОПС) сосудов.

Изучение NO-статуса организма проведено с использованием портативного ручного монитора окиси азота NOBreath V2 (Bedfont Scientific Ltd., Великобритания).

Статистический анализ результатов исследования проводили стандартными методами математической статистики в программе Statistica 7.0 (StatSoft, США). Нормальность распределения количественных показателей оценивали с помощью критериев Шапиро–Уилка. Результаты непараметрических методов обработки представлены в виде медианы (Me) и межквартильного размаха (Q1; Q3), а параметрических – как среднее значение и его ошибка (M±m). Сравнение независимых выборок осуществляли посредством непараметрического U-критерия Манна–Уитни. При множественном сравнении для выборок с нормальным распределением был использован параметрический однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Далее, для выявления статистически значимых различий между конкретными группами применяли апостериорный анализ с помощью теста для множественных сравнений Шеффе. Для оценки взаимосвязей между исследуемыми параметрами обращались к ранговому корреляционному анализу Спирмена. Статистически значимым считалось значение p=0,05.

Результаты

В таблице 1 приведены основные показатели сердечно-сосудистой системы и вариабельности сердечного цикла, а на рисунке — тепловой портрет их относительной динамики у жителей различных регионов России. Анализ показателей артериального давления свидетельствует об отсутствии различий по САД, тогда как средние значения ДАД в группе из северо-западного региона проживания были значительно ниже, а ЧСС, напротив, выше относительно сверстников из северо-восточного региона и средней полосы России. Подобная разница обусловила отличия в гемодинамических паттернах у обследуемых данных популяций. Значимо более высокие величины минутного кровотока, обеспеченные высокой ЧСС на фоне меньших величин ОПС, отражающие объемную регуляцию кровотока, были характерны для представителей северо-западных широт. В то же время у уроженцев Магадана значимо более низкие показатели МОК за счет снижения ЧСС проявлялись на фоне вазоконстрикторных реакций, выражающихся высокими показателями периферического сопротивления сосудов и отражающих сосудистую регуляцию системы кровотока.

Исследование выявило выраженные региональные различия вегетативного статуса у жителей северных территорий: у жителей Магадана отмечено преобладание парасимпатической регуляции (увеличение $MxDMn$, $SDNN$, $RMSSD$, $pNN50\%$, Mo при снижении SI), тогда как у уроженцев Мурманска зафиксирована обратная динамика указанных показателей, что отражает наличие симпатикотонии. У представителей группы сравнения из средней полосы показатели соответствовали нормотонии, что свидетельствует об отсутствии значимых адаптационных перестроек вегетативной регуляции.

Проведенный сравнительный анализ выявил существенную разницу в механизмах сердечно-сосудистой регуляции между исследуемыми популяциями, отражающую разные стратегии гемодинамической адаптации. Полученные данные позволяют выделить два принципиально разных паттерна: преимущественную мобилизацию хронотропного резерва и объемных характеристик гемодинамики (МОК), характерную для населения Мурманска, и активацию вазоконстрикторных механизмов (значимое возрастание ОПС), присущую населению Магадана. Исследование выявило статистически значимые регио-

Таблица 1 | Table 1

Показатели вариабельности сердечного ритма и некоторые характеристики сердечно-сосудистой системы у представителей различных климатогеографических зон Российской Федерации | Indicators of heart rate variability and characteristics of the cardiovascular system in young male residents of different climatic and geographic regions of the Russian Federation

Анализируемый показатель Indicator	Локация научно-исследовательских работ Location of the research, $M \pm m$; M (SD)			P		
	Мурманск Murmansk (1)	Магадан Magadan (2)	Ульяновск, Москва Ulyanovsk, Moscow (3)	1–2	2–3	1–3
САД, мм рт. ст. SBP, mmHg	124,3±1,4	124,5±1,1	124,4±1,2	p=0,89	p=0,95	p=0,94
ДАД, мм рт. ст. DBP, mmHg	72,6±0,9	75,1±0,8	75,8±0,8	p<0,05	p=0,533	p<0,01
ЧСС, уд./мин. Heart rate, bpm	82,0 (74,0; 90,0)	72,5 (66,2; 82,2)	78,0 (71,0; 82,5)	p<0,001	p<0,05	p<0,01
МОК, мл/мин CO, mL/min	5810,5±110,5	5065,8±99,6	5303,5±93,9	p<0,001	p<0,001	p=0,084
ОПС, $\text{дин} \times \text{с} \times \text{см}^{-5}$ TPR, $\text{dyn} \times \text{s} \times \text{cm}^{-5}$	1332,5±30,0	1581,1±33,6	1495,8±28,8	p<0,001	p<0,001	p=0,055
$MxDMn$, мс ms	216,0 (179,3; 253,5)	275,0 (203,0; 387,0)	241,0 (185,0; 314,8)	p<0,001	p<0,05	p<0,01
$RMSSD$, мс ms	27,6 (18,4; 39,2)	42,9 (33,2; 61,1)	32,1(25,4; 44,0)	p<0,001	p<0,001	p<0,01
$pNN50$, %	5,7 (1,6; 16,9)	17,4 (8,7; 35,9)	9,6 (4,6; 21,2)	p<0,001	p<0,001	p<0,01
$SDNN$, мс ms	41,8 (35,6; 50,9)	55,9 (40,1; 78,1)	48,5 (36,2; 60,7)	p<0,001	p<0,05	p<0,01
Mo , мс ms	705,5 (647,5; 771,0)	808,0 (726,0; 905,0)	736,5 (684,5; 831,3)	p<0,001	p<0,001	p<0,01
AMo , мс ms	46,6 (41,0; 57,0)	41,8 (27,1; 52,7)	41,2 (34,1; 55,2)	p<0,01	p=0,38	p<0,01
SI , усл. ед. AU	153,1 (102,4; 213,2)	90,3 (44,9; 169,6)	111,5 (65,7; 220,5)	p<0,001	p<0,05	p<0,01

	Северо-запад России Northwestern region of Russia	Северо-восток России Northeastern region of Russia	Средняя полоса России Central Russia	
САД SBP	124,3 (99,8%)	124,5 (100%)	124,4 (99,9%)	100%
ДАД DBP	72,6 (95,8%)	75,1 (99,1%)	75,8 (100%)	98%
ЧСС HR	81,2 (100%)	73,7 (90,8%)	78,2 (96,3%)	96%
ПД PP	51,7 (100%)	49,4 (95,6%)	48,6 (94%)	94%
УО SV	71,8 (100%)	69,1 (96,2%)	68,2 (95%)	92%
МОК CO	5810,5 (100%)	5065,8 (87,2%)	5303,5 (91,3%)	90%
ОПС TPR	1332,5 (84,3%)	1581,1 (100%)	1495,8 (94,6%)	88%

Рис. Показатели сердечно-сосудистой системы обследованных лиц – жителей трех макрорегионов России

Fig. Cardiovascular system indicators of the individuals who live in the studied regions

Тепловой портрет физиологических показателей по регионам (значения и проценты от максимального в строке)

Heat map of physiological indicators by region (values and percentage of the maximum in a row)

нальные различия в вегетативном статусе у жителей северных территорий, проявляющиеся в полярных паттернах нейровегетативной регуляции: у представителей северо-восточного региона – доминирование парасимпатической активности, у уроженцев

северо-западного региона – выраженная симпатикотония, для средней полосы России – вегетативный баланс.

В таблице 2 показаны характеристики микроциркуляции обследованных лиц.

Таблица 2 | Table 2

Морфологические показатели сосудов микроциркуляторного русла у юношей различных климатогеографических зон Российской Федерации | Morphological parameters of microcirculatory vessels in young male residents of different climatic and geographic regions of the Russian Federation

Анализируемый показатель Indicator	Локация научно-исследовательских работ Location of the research, M (SD)			P		
	Мурманск Murmansk (1)	Магадан Magadan (2)	Ульяновск, Москва Ulyanovsk, Moscow (3)	1–2	1–3	2–3
Диаметр артериального отдела, мкм Diameter of the arterial part, μm	11,9 (4,5)	8,5 (1,6)	8,1 (3,56)	p<0,001	p=0,52	p<0,001
Диаметр венозного отдела, мкм Diameter of the venous part, μm	20,5 (5,15)	12,1 (2,45)	16,2 (3,44)	p<0,001	p<0,001	p<0,001
Диаметр переходного отдела, мкм Diameter of the transition part, μm	22,4 (4,24)	16,8 (3,95)	21,2 (4,2)	p<0,001	p<0,001	p=0,37
Длина капилляра, мкм Capillary length, μm	611 (155,5)	323 (90,5)	465 (122,7)	p<0,001	p<0,001	p<0,001
Плотность капиллярной сети, усл. ед. Capillary network density, AU	0,03 (0,00)	0,04 (0,00)	0,04 (0,00)	p<0,001	p=1	p<0,001
Периваскулярная зона, мкм Perivascular zone, μm	120,9 (26,5)	91,9 (21,8)	112,6 (23,8)	p<0,001	p<0,001	p=0,16
Скорость в артериальном отделе, мкм/с Arterial velocity, $\mu\text{m/s}$	412,7 (184,8)	231,5 (105,5)	329,5 (193)	p<0,001	p=0,06	p=0,25
Скорость в венозном отделе, мкм/с Venous velocity, $\mu\text{m/s}$	263,3 (164,4)	154,3 (87,4)	228,7 (91,2)	p=0,12	p<0,001	p=0,63
Скорость в переходном отделе, мкм/с Transition velocity, $\mu\text{m/s}$	243 (95,8)	181,8 (119,4)	255,8 (118)	p=0,09	p<0,05	p=0,78
Сладжи, ед/с Sludge, Us	4,3 (1,87)	3,1 (2)	3 (1,96)	p=0,06	p=0,85	p=0,12
t, °C	31,7 (3,31)	30,6 (3,3)	31,2 (2,67)	p=0,18	p=0,26	p=0,52

Капилляроскопическая картина демонстрировала выраженные регионспецифические особенности структурной организации микроциркуляторного русла. Морфометрический анализ выявил, что диаметр артериального отдела капилляров (нормативный диапазон: 7–17 мкм, в среднем $11,91 \pm 1,87$ мкм) [8] у юношей Мурманска соответствовал референсному значению, тогда как у представителей Ульяновска, Москвы и Магадана данный показатель приближался к нижней границе физиологической нормы. Венозный отдел, являясь выносящим звеном капиллярной петли, характеризуется повышенной пластичностью по сравнению с артериальным, что обусловлено особенностями структуры сосудистой стенки и механизмами регуляции кровотока [9]. Проведенные исследования показали, что средние значения диаметра венозного отдела у жителей Магадана и средней полосы России соответствовали физиологическому диапазону ($11–20,6$ мкм, среднее $15 \pm 2,42$ мкм) [9], тогда как в мурманчан наблюдалась тенденция к увеличению данного показателя. Диаметр переходного отдела капиллярной петли (ее верхушечной зоны) измеряется по максимальной ширине петли и в норме составляет 8–21 мкм (среднее значение $17,17 \pm 2,12$ мкм) [6]. Полученные данные указывают на то, что лишь среди магаданцев данный показатель соответствовал нормативному диапазону, тогда как у молодых людей из северо-западного региона и средней полосы он превышает верхний предел нормы.

Степень сужения артериального отдела капиллярной петли количественно оценивалась с использованием коэффициента ремоделирования ($K_{\text{во/ао}} = \text{BO/AO}$), отражающего соотношение диаметров венозного отдела (BO) и артериального отдела (AO) [10]. $K_{\text{во/ао}}$ для исследуемых из Магадана составил $1,42 \pm 0,15$ усл. ед., из Мурманска – $1,72 \pm 0,17$ усл. ед., из Москвы и Ульяновска – $2,00 \pm 0,22$ усл. ед. при оптимальном диапазоне 1,2–1,5 усл. ед. [11]. Полученные данные указывают на тот факт, что для юношей северо-востока был характерен баланс артериолярного тонуса и венолярной емкости, а для юношей остальных локаций проживания – нарушение вено-артериального отношения за счет дилатации венозного отдела, что может отражать компенсаторное ремоделирование капилляра и, в свою очередь, обуславливает увеличение периваскулярной зоны (оптимальный диапазон – менее 100 мкм [7]), а также значительное увеличение длины капилляра (нормативный диапазон от 92 до 295 мкм [в среднем $240,0 \pm 38,3$ мкм]) [6] у представителей данных выборок.

Стоит отметить, что плотность капиллярной сети была значимо ниже у молодых людей из Мурманска относительно представителей других локаций исследования. Данное уменьшение количества капилляров на единицу площади способно потенциально содействовать снижению насыщения тканей кислородом и выступать фактором риска патогенеза артериальной гипертензии в будущем [12, 13]. Так как уменьшение

количества капилляров косвенно указывает на негативные структурные изменения микрососудов, это в конечном счете приводит к увеличению общего периферического сосудистого сопротивления [14]. Кроме этого, следует предположить, что более высокая скорость кровотока в артериальном отделе, длина капилляра и диаметры всех отделов капилляров у них могут являться компенсаторной реакцией, направленной на сохранение перфузии в дистальных капиллярах микроциркуляторного русла.

Известно, что симпатические сосудосуживающие и расширяющие сосуды нервы иннервируют все участки кожи, в то время как некоторые участки гладкой кожи (ладони, подошвы, губы) иннервируются только симпатическими сосудосуживающими нервами [15]. Принимая во внимание данный факт и выявленные различия в нейровегетативной регуляции системы кровообращения у представителей различных локаций исследования, нами был проведен корреляционный анализ основного показателя variability сердечного ритма, отражающего симпатическую активность – SI и показателей микроциркуляции, который выявил различные паттерны взаимодействия указанных выше характеристик. Для молодых людей из Магадана установлено снижение симпатии (значимо более низкие величины SI), что ассоциировано с ростом периваскулярной зоны ($r = -0,42 \pm 0,10$, $p < 0,001$) и снижением скорости переходного отдела ($r = -0,41 \pm 0,11$, $p < 0,001$). В группе жителей Мурманска, напротив, возрастание симпатической активности (увеличение SI) обуславливало повышение скорости артериального ($r = 0,51 \pm 0,09$, $p < 0,001$) и венозного ($r = 0,43 \pm 0,10$, $p < 0,001$) отделов капилляра. В выборке жителей средней полосы России показатель SI обратно коррелировал со скоростными характеристиками артериального отдела капилляра ($r = -0,40 \pm 0,11$, $p < 0,001$), венозного отдела ($r = -0,41 \pm 0,11$, $p < 0,001$) и переходного отдела ($r = -0,62 \pm 0,08$, $p < 0,001$).

Обсуждение

Полученные данные указывают на тот факт, что у юношей из Магадана отмечаются относительная вазоконстрикция артериол, минимальный диаметр венул ($12,1 \pm 2,45$ мкм), умеренная периваскулярная зона и сниженная скорость кровотока, наблюдаемые на фоне достаточной плотности капиллярной сети. У представителей Мурманска перестройки капилляроскопического паттерна проявлялись максимальным расширением артериол, выраженной дилатацией венул, широкой периваскулярной зоной на фоне максимальной длины капилляров и скоростных характеристик. Для представителей средней полосы России были характерны умеренные диаметры сосудов, средние показатели скорости кровотока при оптимальной плотности капилляров.

Результаты указывают на преобладание хронотропного компонента регуляции и смещение вегетативного баланса в сторону симпатикотонии у мурманчан, у ма-

гаданцев же доминируют вазомоторные регуляторные механизмы при парасимпатической направленности нейровегетативной регуляции, а у представителей средней полосы способствует сохранению баланса регуляторных механизмов, наблюдаемое при нормотоническом типе вегетативной регуляции. Проведенный корреляционный анализ выявил статистически значимые регионспецифические взаимосвязи между показателем симпатической активности (SI) и параметрами микроциркуляции, результаты которого свидетельствуют о том, что вегетативная нервная система не оказывает прямого влияния на тонус микроциркуляторного русла, ее основной эффект, по-видимому, проявляется в модуляции скоростных характеристик кровотока.

Остается открытым вопрос, что же обуславливает столь выраженные различия в структурно-функциональной организации микроциркуляторного русла среди лиц, проживающих в разных климатогеографических зонах Российской Федерации. Один из возможных механизмов – вазомоторная реакция в виде вызванной холодом вазодилатации (ВХВД), которая наблюдается в дистальных отделах кожи (например, на ладонях и подошвах) и модулирует эффекты вазоконстрикции [13]. ВХВД – это парадоксальное резкое усиление локального кожного кровотока, которое развивается при воздействии холода и приводит к повышению локальной температуры тканей, что может защитить их от холодовых повреждений [16]. Учитывая различия в показателях микроциркуляционного русла, а также температурных параметров, мы можем предположить, что данный физиологический процесс, характерный для жителей северо-запада России, наблюдается на фоне преобладания симпатического отдела вегетативной нервной системы, отчасти это является парадоксальным, но подтверждается результатами нашего корреляционного анализа. Что касается происхождения ВХВД, исследования указывают на механизм центральной регуляции (то есть отсутствие симпатической вазоконстрикции). Это согласуется как с результатами наших исследований, так и со сведениями других авторов [17]. ВХВД – это компонент гомеотермической терморегуляции, основанный на подавлении активации симпатической вазоконстрикторной системы. Она зависит от теплосодержания тела и может быть вызвана избытком тепла с целью сохранения оптимальной температуры [18]. Принципы работы, лежащие в основе ВХВД, до сих пор остаются предметом дискуссий. Однако их анатомическая конечная точка действия, скорее всего, связана с артериовенозными анастомозами (АВА) в микроциркуляторном русле кожи. АВА – это шунты в коже, которые позволяют крови обходить капилляры и поступать напрямую из артериол в вены. Распространенность АВА на кончиках пальцев рук и ног позволила сделать первоначальное, хотя и косвенное, предположение, что их расслабление и увеличение локального кровотока являются причиной ВХВД [19]. Еще одним косвен-

ным аргументом в пользу участия артериовенозных анастомозов в холодовом раздражении является то, что капиллярный кровоток сам по себе не может обеспечить такие потери тепла, которые наблюдаются при холодовом раздражении [20].

Стоит отметить и то, что вазомоторный тонус может быть изменен рядом местных или системных неадренергических медиаторов. Главным кандидатом в качестве местных регуляторов кожного кровотока при холодовом стрессе является оксид азота – NO, мощный сосудорасширяющий медиатор [15]. Сосудорасширяющая роль NO в контроле кожного кровотока [21] привела к его изучению как стимула регуляции ВХВД. Показано, что сублингвальное введение глицерилтринитрата – донора оксида азота, не зависящего от эндотелия, повышало температуру пальцев ног и усиливало кровоток во время погружения стопы в холодную воду, а также ускоряло процесс согревания у людей, чувствительных к холоду [22]. Первичные данные свидетельствуют о том, что средние концентрации NO в выдыхаемом воздухе у юношей северо-западного региона достоверно выше ($23,7 \pm 1,29$ ppb), чем у северо-восточных жителей ($19,9 \pm 1,32$ ppb, $p < 0,05$) и средней полосы России ($17,9 \pm 1,6$ ppb, $p < 0,01$), что, по-нашему мнению, может обуславливать столь выраженные различия структурно-функциональной организации микроциркуляторного русла у жителей двух северных регионов.

Микроциркуляторная перфузия автономно регулируется на местном уровне и объясняется метаболической потребностью тканей [23]. Было высказано предположение, что появление расширенных капилляров обусловлено локальным ответом на тканевую гипоксию [24]. Это согласуется с результатами нашего исследования, в котором скорость потребления кислорода среди магаданцев ($292,2 \pm 4,68$ мл/мин) была значимо выше, чем у сверстников из Заполярья ($262,5 \pm 9,63$ мл/мин [$p < 0,01$]) и средней полосы России ($272,6 \pm 10,6$ [$p < 0,05$]). При этом стоит указать, что у мурманчан фактические величины основного обмена (килокалорий/сутки), хотя и незначительно, находились ниже должных величин (90% против 110% в выборке юношей Магадана и 100% у представителей средней полосы).

Полученные данные демонстрируют выраженные межпопуляционные различия в параметрах микроциркуляции, гемодинамики, вегетативной регуляции и метаболических показателей у жителей северо-восточных и северо-западных регионов России, что отражает формирование различных физиологических стратегий адаптации к хроническому холодовому воздействию. Известно, что хроническое воздействие холода может привести к трем типам физиологических адаптаций – привыканию, метаболическим адаптациям и теплоизоляционным адаптациям. Привыкание – это адаптация, наблюдаемая у многих организмов и характеризующаяся снижением реакции на повторяющиеся раздражители. Считается, что с точки зрения эволюции привы-

кание приносит пользу организму, позволяя экономить метаболические ресурсы [25]. Другие физиологические изменения, связанные с привыканием, включают притупление реакции артериального давления [26], что в наших исследованиях согласуется со значимо более низкими показателями ДАД лишь в выборке юношей северо-западного региона проживания. Согласно современным исследованиям, привыкание происходит в основном за счет центральных механизмов, но некоторые аспекты могут быть обусловлены также периферическими механизмами [25].

У жителей северо-восточного региона выявлены выраженные вазоконстрикторные перестройки, проявляющиеся повышенным общим периферическим сосудистым сопротивлением и склонностью к вазоконстрикции артериального отдела капиллярного русла, которые сочетаются с повышением уровня основного обмена. Данные изменения свидетельствуют о формировании изоляционно-метаболического типа физиологической адаптации к хроническому холодному воздействию.

Считается, что вследствие холодного воздействия появляются компенсаторно-приспособительные реакции, заключающиеся в усилении реактивности альфа-адренорецепторов к адреналину, из-за чего уменьшается кровенаполнение периферических сосудов тела и, таким образом, снижается отдача тепла организмом в неблагоприятных условиях [27]. Отмечается также возможность уменьшения количества коллагена кожи при ее охлаждении, что приводит к окклюзии капилляров на периферии, ограничивающих приток крови к охлаждаемому участку тела [28]. В связи с этим следует отметить наименьшую температуру контактной области эпонихия у юношей данной группы, хотя и без значимых различий в сравнении с представителями других регионов. При уменьшении объема крови последующие количественные (снижение плотности сосудов) и качественные (снижение кровотока) изменения приводят к неоднородности оксигенации и изменению способности к извлечению кислорода. Это частично компенсируется сохраненной ауторегуляцией и повышением скорости метаболизма (и в итоге внутриклеточной температуры) функциональных (нормальных) клеток по сравнению с поврежденными клетками в пределах той же ткани [29].

Анализ полученных данных указывает на формирование изоляционного типа акклиматизации у обследованных лиц Магадана. По мнению авторов [30], притупление реакции системного давления на холод, несмотря на выраженную кожную вазоконстрикцию, указывает на то, что система подкожной микроциркуляции лучше перфузирована после холодной акклиматизации. Данное положение находит подтверждения при анализе результатов газоплазмы в состоянии покоя у юношей из Магадана, когда скорости потребления кислорода были значимо выше относительно сверстников других групп [31].

Заключение

У юношей Магадана выявлены выраженные вазоконстрикторные перестройки (повышенное общее периферическое сопротивление сосудов, минимальный диаметр венул, сочетающиеся с усилением основного обмена и парасимпатикотонией), что соответствует изоляционно-метаболическому типу адаптации. В отличие от этого у представителей северо-запада преобладали реакции привыкания: дилатация артериовенозного звена (максимальная длина капилляров, скорость кровотока, симпатикотония и повышенный уровень оксида азота), что предполагает ключевую роль NO-зависимой и холодной вазодилатаций. Группа представителей средней полосы России демонстрировала сбалансированные показатели микроциркуляции и вегетативной регуляции. Корреляционный анализ подтвердил, что вегетативная нервная система модулирует преимущественно скоростные характеристики кровотока, а не тонус микрососудов. Полученные данные указывают на формирование двух альтернативных адаптационных стратегий: изоляционно-метаболической, характерной для уроженцев Магадана, и стратегии на основе механизма привыкания у представителей Мурманска.

Ограничения исследования

В выборку включены только европеоиды мужского пола, что не позволяет в полной мере описать особенности жителей Севера.

Limitations of the study

The sample contains only male individuals of Caucasian ancestry, which does not allow for a comprehensive description of the characteristics of Northern populations.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования – И.В. Аверьянова.
Сбор и обработка материала – С.И. Вдовенко.
Написание текста – С.И. Вдовенко, И.В. Аверьянова.
Редактирование – С.И. Вдовенко.

Author contributions

Conceived the study and designed the experiment – I.V. Averyanova.
Collected the data and performed the analysis – S.I. Vdovenko.
Wrote the paper – S.I. Vdovenko, I.V. Averyanova.
Edited the manuscript – S.I. Vdovenko.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare no conflict of interest.

Литература/References

1. Гридин Л.А., Шишов А.А., Дворников М.В. Особенности адаптационных реакций человека в условиях Крайнего Севера. Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2014;4(253):4–6. Доступно по адресу: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21473604> (получено 29.08.2025).
Gridin LA, Shishov AA, Dvornikov MV. Features adaptation reactions of human in Far North. Public Health and Life Environment – PH&LE. 2014;4(253):4–6 (In Russ.). Available

- from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21473604> (accessed 29.08.2025).
2. Lal C, Leahy MJ. An updated review of methods and advancements in microvascular blood flow imaging. *Microcirculation*. 2016;23(5):345–63. DOI: 10.1111/micc.12284.
 3. Castellani JW, Young AJ. Human physiological responses to cold exposure: acute responses and acclimatization to prolonged exposure. *Auton Neurosci*. 2016;196:63–74. DOI: 10.1016/j.autneu.2016.02.009.
 4. Young AJ, Lee DT. Aging and human cold tolerance. *Exp Aging Res*. 1997;23(1):45–67. DOI: 10.1080/03610739708254026.
 5. Попкова В.А. Анализ изменения эндокринного профиля жителей города Архангельска в течение 20 лет. *Современные проблемы науки и образования*. 2019;6:159. DOI: 10.17513/spno.29398.
Popkova VA. Analysis of change in the endocrine profile in residents of Arkhangelsk for 20 years. *Modern Problems of Science and Education*. 2019;6:159 (In Russ.). DOI: 10.17513/spno.29398.
 6. Lambova SN. The role of capillaroscopy in rheumatology. 2008;16(1):17–27. *Rheumatology (Bulgaria)*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/287264539_The_role_of_capillaroscopy_in_rheumatology (accessed 29.08.2025).
 7. Fedorovich AA. Non-invasive evaluation of vasomotor and metabolic functions of microvascular endothelium in human skin. *Microvasc Res*. 2012;84(1):86–93. DOI: 10.1016/j.mvr.2012.03.011.
 8. Etehad Tavakol M, Fatemi A, Karbalaie A, Emrani Z, Erlands-son BE. Nailfold capillaroscopy in rheumatic diseases: which parameters should be evaluated? *Biomed Res Int*. 2015;2015:974530. DOI: 10.1155/2015/974530.
 9. Козлов В.И. Гистофизиология системы микроциркуляции. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2003;2(3):79–85. Доступно по адресу: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13074553> (получено 29.08.2025).
Kozlov VI. Histophysiology of microcirculation system. *Regional blood circulation and microcirculation*. 2003;2(3):79–85 (In Russ.). Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13074553> (accessed 29.08.2025).
 10. Pfeiffer A, Schatz H. Diabetic microvascular complications and growth factors. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*. 1995;103(1):7–14. DOI: 10.1055/s-0029-1211323.
 11. Bollinger A, Fagrell B. *Clinical capillaroscopy – a guide to its use in clinical research and practice*. Toronto: Hogrefe & Huber Publ., 1990. 168 p.
 12. Slovinski AP, Hajjar LA, Ince C. Microcirculation in cardiovascular diseases. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2019;33(12):3458–68. DOI: 10.1053/j.jvca.2019.08.008.
 13. Brunner H, Cockcroft JR, Deanfield J, Donald A, Ferrannini E, Halcox J et al. Endothelial function and dysfunction. Part II: Association with cardiovascular risk factors and diseases. A statement by the Working Group on Endothelins and Endothelial Factors of the European Society of Hypertension. *J Hypertens*. 2005;23(2):233–46. DOI: 10.1097/00004872-200502000-00001.
 14. Cheng C, Daskalakis C, Falkner B. Capillary rarefaction in treated and untreated hypertensive subjects. *Ther Adv Cardiovasc Dis*. 2008;2(2):79–88. DOI: 10.1177/1753944708089696.
 15. Johnson JM, Kellogg DL Jr. Local thermal control of the human cutaneous circulation. *J Appl Physiol*. 2010;109(4):1229–38. DOI: 10.1152/jappphysiol.00407.2010.
 16. Daanen HA, van der Struijs NR. Resistance Index of Frostbite as a predictor of cold injury in arctic operations. *Aviat Space Environ Med*. 2005;76(12):1119–22. PMID: 16370261.
 17. Flouris AD, Westwood DA, Mekjavic IB, Cheung SS. Effect of body temperature on cold induced vasodilation. *Eur J Appl Physiol*. 2008;104(3):491–9. DOI: 10.1007/s00421-008-0798-3.
 18. Flouris AD, Cheung SS. On the origins of cold-induced vasodilation. *Eur J Appl Physiol*. 2010;108(6):1281–2. DOI: 10.1007/s00421-009-1324-y.
 19. Fox RH, Wyatt HT. Cold-induced vasodilatation in various areas of the body surface of man. *J Physiol*. 1962;162(2):289–97. DOI: 10.1113/jphysiol.1962.sp006933.
 20. Speelman CR. Effect of ambient air temperature and of hand temperature on blood flow in hands. *Am J Physiol*. 1945;145:218–22. DOI: 10.1152/ajplegacy.1945.145.2.218.
 21. Johnson JM, Minson CT, Kellogg DL Jr. Cutaneous vasodilator and vasoconstrictor mechanisms in temperature regulation. *Compr Physiol*. 2014;4(1):33–89. DOI: 10.1002/cphy.c130015.
 22. Hope K, Eglin C, Golden F, Tipton M. Sublingual glyceryl trinitrate and the peripheral thermal responses in normal and cold-sensitive individuals. *Microvasc Res*. 2014;91:84–9. DOI: 10.1016/j.mvr.2013.11.002.
 23. Segal SS. Regulation of blood flow in the microcirculation. *Microcirculation*. 2005;12(1):33–45. DOI: 10.1080/10739680590895028.
 24. Cutolo M, Grassi W, Matucci Cerinic M. Raynaud’s phenomenon and the role of capillaroscopy. *Arthritis Rheum*. 2003;48(11):3023–30. DOI: 10.1002/art.11310.
 25. Yurkevicius BR, Alba BK, Seeley AD, Castellani JW. Human cold habituation: physiology, timeline, and modifiers. *Temperature (Austin)*. 2021;9(2):122–57. DOI: 10.1080/23328940.2021.1903145.
 26. Mäkinen TM, Mäntysaari M, Pääkkönen T, Jokelainen J, Palinkas LA, Hassi J et al. Autonomic nervous function during whole-body cold exposure before and after cold acclimation. *Aviat Space Environ Med*. 2008;79(9):875–82. DOI: 10.3357/ASEM.2235.2008.
 27. Медведев В.И., Косенков Н.И. Закономерности взаимодействия гормональных влияний и собственной активности клеток в процессе адаптации. *Физиология человека*. 1989;15(1):121–130. Доступно по адресу: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32471620> (получено 30.08.2025).
Medvedev VI, Kosenkov NI. Interaction patterns between hormonal influences and intrinsic cellular activity during adaptation. *Human Physiology*. 1989;15(1):121–130 (In Russ.). Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32471620> (accessed 30.08.2025).
 28. Zeveke AV, Efes ED, Polevaya SA. Integrative framework for activation of skin receptors: patterns of activity of mechanoreceptors versus “labeled lines”. *J Integr Neurosci*. 2013;12(1):47–56. DOI: 10.1142/S0219635213500052.
 29. Oelkrug R, Goetze N, Exner C, Lee Y, Ganjam GK, Kutschke M et al. Brown fat in a protoendothermic mammal fuels eutherian

- evolution. *Nat Commun.* 2013;4:2140. DOI: 10.1038/ncomms3140.
30. *Muza SR, Young AJ, Bogart JE, Pandolf KB.* Respiratory and cardiovascular responses to cold stress following repeated cold water immersion. *Undersea Biomed Res.* 1988;15(3):165–78. PMID: 3388627.
31. *Вдовенко С.И., Аверьянова И.В.* Сравнительные особенности метаболизма и функции внешнего дыхания у юношей – постоянных жителей различных климатогеографических зон Северо-Востока России. *Якутский медицинский журнал.* 2019;2(66):28–31. DOI 10.25789/YMJ.2019.66.08.
- Vdovenko SI, Averyanova IV.* Comparative features of metabolism and functioning of the external respiration in young male residents of different climatic and geographical areas of Russian North-East. *Yakut Medical Journal.* 2019;2(66):28–31 (In Russ.). DOI 10.25789/YMJ.2019.66.08.

Информация об авторах

Сергей Игоревич Вдовенко – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологии экстремальных состояний НИЦ «Арктика» ДВО РАН.

Инесса Владиславовна Аверьянова – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории физиологии экстремальных состояний НИЦ «Арктика» ДВО РАН.

Author information

Sergei I. Vdovenko – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory for Physiology of Extreme States, Scientific Research Center “Arktika”, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.
<http://orcid.org/0000-0003-4761-5144>

Inessa V. Averyanova – Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Laboratory for Physiology of Extreme States, Scientific Research Center “Arktika”, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.
<http://orcid.org/0000-0002-4511-6782>