

УДК 612.135

*ТВЕРИТИНА Елена Сергеевна, аспирант,
ассистент кафедры анатомии и физиологии жи-
вых организмов Белгородского государственного
национального исследовательского университета.
Автор 17 научных публикаций*

МЕХАНИЗМЫ РЕГУЛЯЦИИ КРОВОТОКА КОЖИ У ЛИЦ РАЗНЫХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП

Методом лазерной доплеровской флоуметрии установлены возрастные различия механизмов регуляции микрососудов кожи у подростков и лиц юношеского возраста в условиях локальной тепловой пробы. Выявлено, что в термонейтральных условиях для девочек по сравнению с группой девушек характерен более высокий нейрогенный и миогенный тонус сосудов и сходное воздействие пульсовой волны и дыхательной экскурсии грудной клетки на показатели кровотока. Однако в условиях локальной гипертермии наблюдается модуляция кровотока, обусловленная снижением симпатического влияния на сосудистую стенку артериол, что вызывает повышение уровня шунтирующего кровотока через артериоло-венулярные анастомозы. У девушек изменяется преимущественно миогенный тонус сосудистой стенки с включением пассивных факторов регуляции кровотока, существенно выраженных при конечно заданной температуре.

Ключевые слова: микрососуды кожи, термонейтральные условия, локальная гипертермия, регуляция кровотока.

Капиллярная сеть вместе с артериолами и венами действует как единый модуль, обеспечивая кровоснабжение отдельного микро-региона органа и поддерживая в нем гомеостаз [1]. Существуют многочисленные факторы, контролирующие микроциркуляцию. Наиболее сложное взаимодействие локальных и общих механизмов регуляции кровотока представлено в микроциркуляторном русле кожи. Многочисленные исследования [1, 4] выявили, что кровоток кожи, как у лиц мужского, так и женского пола, характеризуется большим разнообразием. Причем с возрастом наблюдается перестройка

механизмов регуляции микроциркуляции, что может быть связано со структурными изменениями микрососудистого русла кожи.

Цель исследования – оценить реактивность микрососудистого русла кожи в условиях локальной гипертермии у лиц подросткового и юношеского возраста.

Материалы и методы. В основу работы положены результаты обследований девочек в возрасте 12–13 лет ($n = 19$) и девушек в возрасте 18–21 года ($n = 39$). Исследование включало регистрацию реакции кожных микрососудов на температурное воздействие.

Запись показателей микроциркуляторного русла кожи проводили с помощью двухканального лазерного анализатора капиллярного кровотока «ЛАКК-02» (НПП «Лазма», Россия) в красной области спектра излучения (КР, длина волны 0,63 мкм, мощность излучения 0,5 мВт). При исследовании реакции микрососудов кожи на температурное воздействие использовали блок «ЛАКК-ТЕСТ» (НПП «Лазма», Россия). Во время обследования испытуемый находился в положении сидя, область исследования – ниже уровня сердца [3]. В течение всех этапов эксперимента зонд флоуметра фиксировали на коже ладонной поверхности дистальной фаланги второго пальца кисти левой руки.

Исходные данные лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) записывали в течение 5 мин. Запись тепловой (дилататорной) пробы проводили со скоростью 4 °С в мин в течение 10 мин, из которых 210 с – в температурных границах от 32 °С до 45 °С и 390 с – при постоянной температуре 45 °С.

Полученные ЛДФ-граммы анализировали на основе вейвлет-преобразования [3] в 4 температурных диапазонах: от 32 °С до 39 °С, от 39 °С до 45 °С, первые две мин – воздействия 45 °С, последние 4 мин воздействия – 45 °С.

Определяли следующие показатели: среднеарифметический показатель микроциркуляции (М, пф. ед. (перфузионные единицы); среднее квадратическое отклонение (флак) амплитуды колебаний кровотока от среднего арифметического значения М (σ, пф. ед.); коэффициент вариации $K_v = \sigma / \text{ПМ} \times 100 \%$.

Оценивали функциональный вклад эндотелиального (Э), кардиального (С) и дыхательного (Д) ритмов в модуляцию микрокровотока по формуле: $(A_{\max} / 3\sigma) 100 \%$. Считается, что дыхательный и пульсовой компоненты относятся к пассивным факторам регуляции кровотока, вызывающим колебания кровотока вне системы микроциркуляции [3].

Нейрогенный тонус прекапиллярных резистивных микрососудов (НТ) и миогенный тонус (МТ) метартериол и прекапиллярных

сфинктеров, а также показатель шунтирования (ПШ) определяли по формулам:

$$\text{НТ} = (\sigma \times \text{АД}_{\text{ср}}) / (\text{Ан} \times \text{ПМ}),$$

$$\text{МТ} = (\sigma \times \text{АД}_{\text{ср}}) / (\text{Ам} \times \text{ПМ}),$$

$$\text{ПШ} = \text{МТ} / \text{НТ} [3],$$

где $\text{АД}_{\text{ср}}$ – среднее артериальное давление, ПМ – показатель микроциркуляции, Ан – усредненная максимальная амплитуда нейрогенного ритма, Ам – усредненная максимальная амплитуда миогенного ритма.

Значение тонуса сосудов указывает на изменение жесткости самой сосудистой стенки и регуляцию кровотока кожи на уровне шунтов.

Статистическую обработку полученных данных и все виды анализа результатов проводили с помощью программы «Statistica 7.0». Достоверность различий определяли с помощью парного критерия Вилкоксона и критерия Манна – Уитни. За уровень статистически значимых принимали изменения при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. В термонейтральных условиях у девушек показатель микроциркуляции был ниже по сравнению с подростками, однако кровоснабжение у них происходило на уровне всех звеньев микрососудов кожи (табл. 1). Об этом свидетельство-

Таблица 1

ПОКАЗАТЕЛИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВОТОКА ДЕВОЧЕК И ДЕВУШЕК В ТЕРМОНЕЙТРАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ, М±m

Показатели (красный канал, 22 °С)	Девочки, n = 19	Девушки, n = 39
Э	17,33±1,07	16,69±0,73
Д	7,77±0,57	7,62±0,38
С	4,78±0,50	4,88±0,32
НТ (отн. ед.)	1,51±0,050	1,34±0,03*
МТ (отн. ед.)	1,70±0,06	1,66±0,05 *
ПШ (отн. ед.)	1,14±0,05	1,29±0,06
М (пф. ед.)	10,74±0,67	9,09±0,50
σ (пф. ед.)	1,34±0,10	2,10±0,40*

Примечание. * – достоверность различий показателей девочек и девушек по критерию Манна–Уитни ($p < 0,05$); отн. ед. – относительные единицы

вали более низкое значение миогенного тонуса прекапиллярных сфинктеров, последнее звено контроля кровотока кожи перед капиллярным руслом и высокое значение показателя шунтирования. Девочки-подростки отличались сниженным значением флакса, что указывало на угнетение активных вазомоторных механизмов модуляции тканевого кровотока и преобладание в регуляции тонических симпатических влияний [3]. Подтверждением выявленного процесса было более высокое значение нейрогенного тонуса сосудов по сравнению с лицами юношеского возраста.

Колебания кровотока кожи, обусловленные изменением пульсовой волны и дыхательной экскурсии грудной клетки, не имели существенных различий в рассматриваемых группах, о чем свидетельствуют значения кардиального и дыхательного ритмов.

В условиях тепловой пробы было установлено отличие механизмов регуляции кровотока кожи у лиц разных возрастных групп (табл. 2), однако сосудистые реакции были выражены как у девушек, так и у девочек.

Повышение температуры вызвало сходное существенное увеличение кровотока кожи

Таблица 2

ПОКАЗАТЕЛИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ ДЕВОЧЕК И ДЕВУШЕК В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОЙ ПРОБЫ, М±m

Т, °С	Показатели	Девочки	Девушки
32–39	Д	10,73±0,99*	10,91±0,65*
	С	7,37±0,99*	6,16±0,39*
	НТ (отн. ед)	1,49±0,09	1,34±0,06
	МТ (отн. ед)	1,58±0,10*	1,45±0,06*
	ПШ (отн. ед)	1,10±0,09	1,09±0,03
39–45	Д	9,85±0,88*	10,64±0,59*
	С	5,88±0,68*	6,83±0,54*
	Э	16,16±0,76	15,56±0,56
	НТ (отн. ед)	1,34±0,06*	1,35±0,05
	МТ (отн. ед)	1,44±0,04*	1,46±0,05*
45 (в течение 2 мин)	ПШ (отн. ед)	1,09±0,04	1,10±0,04
	Д	8,79±0,87	9,99±0,44*
	С	5,28±0,57	7,61±0,58*
	НТ (отн. ед)	1,39±0,08*	1,38±0,04
	МТ (отн. ед)	1,71±0,09	1,49±0,04
45 (в течение 4 мин)	ПШ (отн. ед)	1,29±0,010*	1,11±0,04
	Д	9,15±0,86	9,19±0,47*
	С	4,68±0,41	6,09±0,40*
	Э	18,01±0,99*	16,21±0,51
	НТ (отн. ед)	1,51±0,09	1,51±0,04
	МТ (отн. ед)	1,79±0,09	1,57±0,05
	ПШ (отн. ед)	1,27±0,11*	1,07±0,04

Примечание. * – достоверность различий по критерию Вилкоксона (* – p < 0,05)

у исследуемых в рассматриваемых группах, особенно в начальный период нагревания. Так, в температурном диапазоне 32–43 °С уровень перфузии ткани кровью у подростков составил $13,5 \pm 0,95$ пф. ед., у лиц юношеского возраста – $14,5 \pm 0,6$ пф. ед. Поддержание конечно заданной температуры способствовало еще большему увеличению кровотока кожи, более значительному у девушек ($17,5 \pm 0,5$ пф. ед. против $15,9 \pm 0,7$ пф. ед. у девочек).

Анализ механизмов регуляции микрососудистого русла у девочек показал, что первые минуты нагревания вызвали активацию миогенных механизмов регуляции кровотока и снижение миогенного тонуса прекапиллярных сфинктеров. Выявленный процесс способствовал притоку крови в микроциркуляторное русло кожи, о чем свидетельствовало значительное повышение кардиального ритма. В условиях воздействия высоких температур (39–45 °С) на кожную поверхность пальца руки регуляция кровотока кожи осуществлялась преимущественно за счет изменения нейrogenного тонуса артериол и показателя шунтирования.

Волярная поверхность пальца руки богата атриоло-венулярными анастомозами, которые играют существенную роль в регуляции кровотока. Они значительно активируются при термических воздействиях [10] и регулируются изменением тонуса сосудистой стенки артериол. В условиях поддержания конечно заданной температуры изменения наблюдались именно на уровне шунтов, о чем свидетельствовал бурный рост показателя шунтирования, вызванный снижением нейrogenного тонуса сосудов при температуре от 39 °С. Необходимо отметить, что последние минуты нагревания способствовали дополнительной активации эндотелиального ритма, что указывало на повышение уровня оксида азота [9] и согласуется с ранее установленными данными о регуляции

кровотока кожи в конечный период локальной гипертермии [2, 7, 8].

В группе девушек в начальный период тепловой пробы регуляция кровотока кожи осуществлялась преимущественно за счет изменения миогенного тонуса сосудов, о чем свидетельствовало снижение данного показателя в температурных диапазонах 32–39 °С и 39–45 °С. В условиях конечно заданной температуры регистрировали значительный рост пассивных факторов. Так, на дилатацию крупных артериол указывало изменение функционального вклада кардиального ритма в кровоток [5, 6]. Выявленный процесс вызвал повышение объема крови в венозном звене, о чем свидетельствовало значение показателя дыхательного ритма. Существенный прирост кровотока в условиях тепловой пробы на фоне изменения дыхательного ритма указывал на небольшие застойные явления в микрососудистом русле кожи и увеличивал отраженный сигнал, идущий от эритроцитов, повышая уровень перфузии ткани кровью при зондировании [3]. Возможно, по этой причине в группе девушек зарегистрировали более высокое значение кровотока кожи при воздействии 45 °С на кожу пальца руки по сравнению с девочками.

Заключение. Таким образом, проведенное нами исследование выявило различие механизмов регуляции микроциркуляторного русла кожи у лиц разных возрастных групп. В термонейтральных условиях группа девочек отличается более высоким тонусом сосудов по сравнению с девушками, однако в условиях температурной пробы вазомоторных мышечных компонентов сосудистой стенки играют существенную роль в регуляции кровотока кожи в их группе. При воздействии высокой температуры рост кровотока кожи обусловлен изменением объема крови на уровне атриоло-венулярных анастомозов в группе подростков, крупных артериол – в группе лиц юношеского возраста.

Список литературы

1. Козлов В.И. Система микроциркуляции крови: клинико-морфологические аспекты изучения // Регионар. кровообращение и микроциркуляция. 2006. Т. 5, № 17. С. 84–101.
2. Красников Г.В., Танканаг А.В., Коняева Т.Н. и др. Оценка изменений в системе регуляции кровотока в коже человека при локальном нагреве // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2007. Т. 93, № 4. С. 394–401.
3. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. М., 2005. 123 с.
4. Литвин Ф.Б. Морфофункциональная перестройка системы микроциркуляции у детей, подростков и юношей, проживающих в местах с разными радиоэкологическими условиями: дис. ... докт. биол. наук. М., 2006. 320 с.
5. Федорович А.А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Регионар. кровообращение и микроциркуляция. 2010. Т. 9, № 1(33). С. 49–60.
6. Цехмистренко Т.А., Станишевская Т.И. Индивидуально-типологические особенности состояния микроциркуляции крови у девушек // Регионар. кровообращение и микроциркуляция. 2006. № 1(17). С. 51–57.
7. Bollinger A., Hoffmann U., Franzeck U.K. Evaluation of Flux Motion in Man by the Laser Doppler Technique // Blood vessels. 1991. Vol. 28. Suppl. 1. P. 21.
8. Minson C.T., Berry L.T., Joyner M.J. Nitric Oxide and Neurally Mediated Regulation of Skin Blood Flow During Local Heating // J. Appl. Physiol. 2001. Vol. 91, № 4. P. 1619–1626.
9. Vallance P., Patton S., Bhagat K. et al. Direct Measurement of Nitric Oxide in Human Beings // Lancet. 1995. Vol. 346. P. 153–154.
10. Wallin B.G. Neural Control of Human Skin Blood Flow // J. Auton. Nerv. System. 1990. Vol. 30 (suppl). P. 185–190.

References

1. Kozlov V.I. Sistema mikrotsirkulyatsii krovi: kliniko-morfologicheskie aspekty izucheniya [The System of Microcirculation: Clinical-Morphological Aspects of Studying]. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*, 2006, vol. 5, no. 1 (17), pp. 84–101.
2. Krasnikov G.V., Tankanag A.V., Konyaeva T.N. i dr. Otsenka izmeneniy v sisteme regulyatsii krovotoka v kozhe cheloveka pri lokal'nom nagreve [Assessment of the Changes in Regulatory Systems of Human's Skin Blood Flow During Local Heating]. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I.M. Sechenova*, 2007, vol. 93, no. 4, pp. 394–401.
3. Krupatkin A.I., Sidorov V.V. *Lazernaya dopplerovskaya floumetriya mikrotsirkulyatsii krovi* [Measurement of Microcirculation Using Laser Doppler Flowmetry]. Moscow, 2005. 123 p.
4. Litvin F.B. *Morfofunktsional'naya perestroyka sistemy mikrotsirkulyatsii u detey, podrostkov i yunoshey, prozhivayushchikh v mestakh s raznymi radioekologicheskimi usloviyami: dis. ... dokt. biol. nauk* [Morphofunctional Restructuring of the System of Microcirculation in Children, Adolescents and Young People Living in Areas with Various Radioecological Conditions: Dr. Biol. Sci. Diss.]. Moscow, 2006. 320 p.
5. Fedorovich A.A. Funktsional'noe sostoyanie regulyatornykh mekhanizmov mikrotsirkulyatornogo krovotoka v norme i pri arterial'noy gipertonii po dannym lazernoy dopplerovskoy floumetrii [The Functional State of Regulatory Mechanisms of the Microcirculatory Blood Flow in Normal Conditions and in Arterial Hypertension According to Laser Doppler Flowmetry]. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*, 2010, vol. 9, no. 1 (33), pp. 49–60.
6. Tsekhmistrenko T.A., Stanishevskaya T.I. Individual'no-tipologicheskie osobennosti sostoyaniya mikrotsirkulyatsii krovi u devushek [Individual and Typological Features of Microcirculation in Girls]. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*, 2006, vol. 5, no. 1 (17), pp. 51–57.
7. Bollinger A., Hoffmann U., Franzeck U.K. Evaluation of Flux Motion in Man by the Laser Doppler Technique. *Blood Vessels*, 1991, vol. 28. Suppl. 1, p. 21.
8. Minson C.T., Berry L.T., Joyner M.J. Nitric Oxide and Neurally Mediated Regulation of Skin Blood Flow During Local Heating. *J. Appl. Physiol.*, 2001, vol. 91, no. 4, pp. 1619–1626.

9. Vallance P., Patton S., Bhagat K., et al. Direct Measurement of Nitric Oxide in Human Beings. *Lancet*, 1995, vol. 346, pp. 153–154.

10. Wallin B.G. Neural Control of Human Skin Blood Flow. *J. Auton. Nerv. System*, 1990, vol. 30 (suppl), pp. 185–190.

Tveritina Elena Sergeevna

Postgraduate Student,
Belgorod National Research University (Belgorod, Russia)

MECHANISMS REGULATING BLOOD FLOW TO THE SKIN IN VARIOUS AGE GROUPS

Using Laser Doppler Flowmetry we established age-related differences in skin microvessel regulation in adolescents and young people during local heating. In thermoneutral environment, young girls, compared to older girls, had a higher neurogenic and myogenic vascular tone and a similar effect of the pulse wave and chest excursion on the blood flow. However, at local hyperthermia we observed blood flow modulation due to decreasing sympathetic effect on the vascular wall of arterioles, which causes an increase in shunting blood flow through arteriole-venular anastomoses. Older girls had changes mainly in the myogenic tone of the vascular wall with inclusion of passive factors of blood flow regulation, especially pronounced at the given end temperature.

Keywords: *skin microvessels, thermoneutral conditions, local hyperthermia, blood flow regulation.*

Контактная информация:
адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85;
e-mail: tveritina@bsu.edu.ru

Рецензент – *Корчин В.И.*, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой нормальной и патологической физиологии Ханты-Мансийской государственной медицинской академии