

УДК 616-072.7: 612.13

DOI: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-27-34

САГАЙДАЧНЫЙ А. А., ФОМИН А. В.,  
СКРИПАЛЬ А. В., УСАНОВ Д. А.

## Температурные и гемодинамические эффекты при проведении окклюзионной пробы на верхних конечностях здоровых испытуемых: синхронность, вазоконстрикция, вазодилатация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

e-mail: andsag@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12.07.17; принята к печати 23.10.17

### Реферат

*Цель* исследования – описание температурных и гемодинамических эффектов, возникающих при проведении окклюзионной пробы (ОП).

*Материал и методы.* Реакция на ОП исследована методами термографии, фотоплетизмографии, магнитно-резонансной томографии и ультразвуковой доплерографии.

*Результаты исследования.* В состоянии покоя наблюдается синхронность колебаний температуры кожи и гемодинамики левой и правой кистей. В состоянии окклюзии происходит вазоконстрикция артерий ниже манжеты, кровь депонируется в венозном русле. Впервые зарегистрировано открытие потовых каналов на поверхности пальцев испытуемых во время создания и/или снятия окклюзии.

*Выводы.* Окклюзия приводит к переходу от колебательного режима изменения тонуса сосудов плеча и кисти к режиму вазоконстрикции, а после снятия окклюзии – к вазодилатации.

*Ключевые слова:* окклюзионная проба, фотоплетизмография, термография, магнитно-резонансная томография, доплерография, синхронность, вазоконстрикция, вазодилатация

*Для цитирования:* Сагайдачный А. А., Фомин А. В., Скрипаль А. В., Усанов Д. А. Температурные и гемодинамические эффекты при проведении окклюзионной пробы на верхних конечностях здоровых испытуемых: синхронность, вазоконстрикция, вазодилатация. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017;16(4):27–34. doi: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-27-34

UDC 616-072.7: 612.13

DOI: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-27-34

SAGAIDACHNYI A. A., FOMIN A. V.,  
SKRIPAL A. V., USANOV D. A.

## Temperature and hemodynamic effects during the occlusion test on the upper limbs of healthy subjects: synchronicity, vasoconstriction, vasodilation

Saratov State University

410012, Russia, Saratov, Astrakhanskaya 83

e-mail: andsag@yandex.ru

Received 12.07.17; accepted 23.10.17

### Abstract

The *aim* of the study is to describe the temperature and hemodynamic effects that occur during the pressure cuff test (CT).

*Materials and methods.* The reaction to CT has been studied by thermography, photoplethysmography, magnetic resonance imaging and ultrasound dopplerography.

*Results.* At rest oscillations in skin temperature and hemodynamics of the left and right hands were synchronous. During occlusion a vasoconstriction of arteries below the cuff occurred, the blood being deposited in the venous bed. The opening of the sweat channels on the fingers of the subjects during the application and/or removal of occlusion was recorded for the first time.

**Conclusions.** Occlusion leads to a transition from the oscillatory regime of changes in the tonus of the vessels of the shoulder and hand to the regime of vasoconstriction, and after the removal of occlusion – to vasodilation. Key words: occlusion test, photoplethysmography, thermal imaging, magnetic resonance imaging, dopplerography, synchronicity, vasoconstriction, vasodilation.

**Key words:** occlusion test, photoplethysmography, thermal imaging, magnetic resonance imaging, dopplerography, synchronicity, vasoconstriction, vasodilation

**For citation:** Sagaidachnyi A. A., Fomin A. V., Skripal A. V., Usanov D. A. Temperature and hemodynamic effects during the occlusion test on the upper limbs of healthy subjects: synchronicity, vasoconstriction, vasodilation. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2017;16(4):27–34. doi: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-27-34

## Введение

В настоящее время наблюдается рост интереса к оценке состояния и функций периферической сосудистой системы с использованием окклюзионной пробы. Суть данного теста заключается в провокации сосудистых реакций посредством кратковременной блокировки венозного и/или артериального кровотока конечности манжетой тонометра (ишемия) и развитием реактивной гиперемии после снятия окклюзии (реперфузия). Возрастание интереса к изучению реакции на окклюзионную пробу обусловлено наличием перспектив использования данного теста не только в качестве процедуры для выявления дисфункции эндотелия, являющейся предвестником развития атеросклероза [22], но и в качестве способа осуществления дистантного ишемического preconditionирования миокарда [12, 24].

Для изучения реакции организма человека на окклюзию конечностей используются различные инструментальные средства. Одним из первых использовался метод ультразвукового наблюдения динамики скорости кровотока в бедренной артерии при окклюзии лодыжки [16] и позже – плечевой и бедренной артерий [14]. На сегодняшний день к одному из наиболее распространенных инструментов изучения реакции на окклюзию конечностей можно отнести метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) [4]. С помощью метода ЛДФ установлено резкое увеличение амплитуд колебаний кровотока в кардиальном, дыхательном и миогенном диапазонах в начальный момент после снятия окклюзии [8, 23]; отмечается взаимосвязь активности метаболических процессов и амплитуды эндотелиальных колебаний после снятия окклюзии [11]; установлено, что многократная окклюзия-реперфузия может рассматриваться в качестве терапевтической процедуры, стимулирующей повышение амплитуды колебаний периферического кровотока и улучшение микроциркуляции [1].

В последнее десятилетие активно развивается контактный температурный метод исследования реакции организма на окклюзию конечностей (DTM – digital thermal monitoring) [3, 13, 21]. Повышение температурного и временного разрешения современных тепловизоров стимулировало развитие методов тепловизионной диагностики на основе мониторинга реакции на окклюзионную пробу [2, 5, 7, 10]. Между колебаниями кожной температуры и колебаниями кожного кровотока существует тесная взаимосвязь [9, 19], что позволяет использовать метод динамической термографии в качестве инструмента для исследования периферической гемодинамики.

По сравнению с методом ЛДФ, преимуществом тепловизионного способа является возможность двухмерного анализа динамики кровотока в каждой точке объекта. Развитие и применение метода спектральной фильтрации динамических термограмм позволили визуализировать двухмерное распределение кожного кровотока при проведении окклюзионной пробы [6, 18]. Существуют примеры современной термовизуализации кожного кровотока при проведении окклюзионной пробы (<https://www.youtube.com/watch?v=u-4DR7tkDX0>).

Для выявления диагностического потенциала методов диагностики, основанных на использовании окклюзионной пробы, и формирования модели реакции организма на данный вид функциональной нагрузки актуальным является всестороннее изучение явлений, возникающих в состояниях кратковременной ишемии и последующей реперфузии. **Целью** работы является описание температурных и гемодинамических эффектов, возникающих при проведении окклюзионной пробы и регистрируемых различными инструментальными средствами.

## Материал и методы исследования

Измерения температурной реакции на окклюзионную пробу проводились с помощью тепловизионной камеры ThermoCAM SC3000 фирмы FLIR Systems (Швеция) с макроскопической насадкой, температурной чувствительностью 0,02 °C и разрешением 320×240 пикселей, работающей в диапазоне длин волн 8–9 мкм. Скорость записи динамических термограмм – 2 кадра/с. Временные зависимости температуры строились с помощью программного обеспечения для обработки термограмм «ThermoCAM Researcher Pro 2.8». Сигнал пульсового кровенаполнения измерялся с использованием отражательного фотоплетизмографического датчика KL-79102 в составе системы для биомедицинских измерений KL-72001 (Тайвань).

Для визуализации просвета плечевой артерии до и во время окклюзии использовался магнитно-резонансный томограф Magnetom SP Siemens (Германия), напряженность магнитного поля – 1,5 Тл. Скорость кровотока в лучевой артерии регистрировалась с помощью комплекса для ультразвуковых доплерографических обследований «Сономед 300» (Россия) с датчиком 8 МГц.

Измерения проведены на 14 здоровых испытуемых (6 женщин и 8 мужчин) в возрасте 20–35 лет без выявленных сердечно-сосудистых патологий. Все записи физиологических сигналов проводились в положении сидя с предварительной адаптацией испытуемых к лабораторным условиям в течение 15 мин.

## Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим температурные и гемодинамические явления, регистрируемые в состояниях до, во время и после манжеточной окклюзии плечевой артерии условно здоровых испытуемых.

### 1. Предокклюзионный период

В предокклюзионный период отмечается синхронность динамики температуры левой и правой конечностей (рис. 1). На термограмме кистей (рис. 1, а) круглые области отмечают зону измерения температуры фаланг пальцев левой и правой кистей.

Динамика температуры (рис. 1, б) отражает коррелированность гемодинамических процессов левой и правой кистей (коэффициент корреляции  $r=0,95$ ). При этом в группе испытуемых для левой и правой кистей наблюдаются колебания температуры, близкие как по форме, так и по амплитудным значениям. Для исследованной группы испытуемых разность температур соответствующих зон левой и правой кистей имела среднее значение около  $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$  при средней амплитуде колебаний температуры около  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1, б).

### 2. Окклюзионный и постокклюзионный периоды

Во время создания давления манжеты на плечо выше систолического на 30–60 мм рт. ст. (рис. 2, а) происходит полное перекрытие просвета плечевой артерии (рис. 2, б, в).

В начальный момент увеличения давления манжеты на плечо происходит сначала небольшое повышение температуры фаланг пальцев, затем почти монотонное понижение температуры (рис. 3, а). Повышение температуры пальцев в начальной фазе компрессии, по-видимому, является следствием блокирования венозного оттока из области кисти и предплечья, а также следствием увеличения скорости кровотока плечевой артерии при значениях давления в манжете, близких к систолическому. Эти процессы приводят к нарушению синхронности (линейной зависимости) колебаний температуры контралатеральных областей, что можно продемонстрировать, строя зависимость температуры левой руки от температуры правой руки (рис. 3, б).

В состоянии покоя наблюдается линейное соотношение между температурой правой и левой рук, значения температуры укладываются в ограниченный диапазон (квадрат на рис. 3, б). Во время окклюзии происходит нарушение линейного соотношения между динамикой температуры левой и правой конечностей. Временной интервал от момента отклонения

до момента возвращения температурной динамики к линейному закону можно отнести к периоду первичной температурной реакции на окклюзию. В приведенном примере на рис. 3, а указанному периоду соответствует временной интервал 15,5–18 мин.

### Реакция артерий и вен предплечья на окклюзию

При проведении окклюзионной пробы наблюдаются локальные температурные изменения в зоне проекции артерий и вен предплечья на поверхность кожи. На рис. 4, а приведены термограммы зоны предплечья во время проведения окклюзионной пробы и изменение температуры кожи в зонах проекции вены и артерии (рис. 4, б).

На приведенных зависимостях видно, что до окклюзии температура кожи в области артерий выше температуры окружающих тканей, температура в области вен ниже температуры окружающих тканей, так как кровь отдает тепло окружающей среде, проходя через сосуды дистальных отделов конечности и возвращаясь по венам. Во время окклюзии темпера-

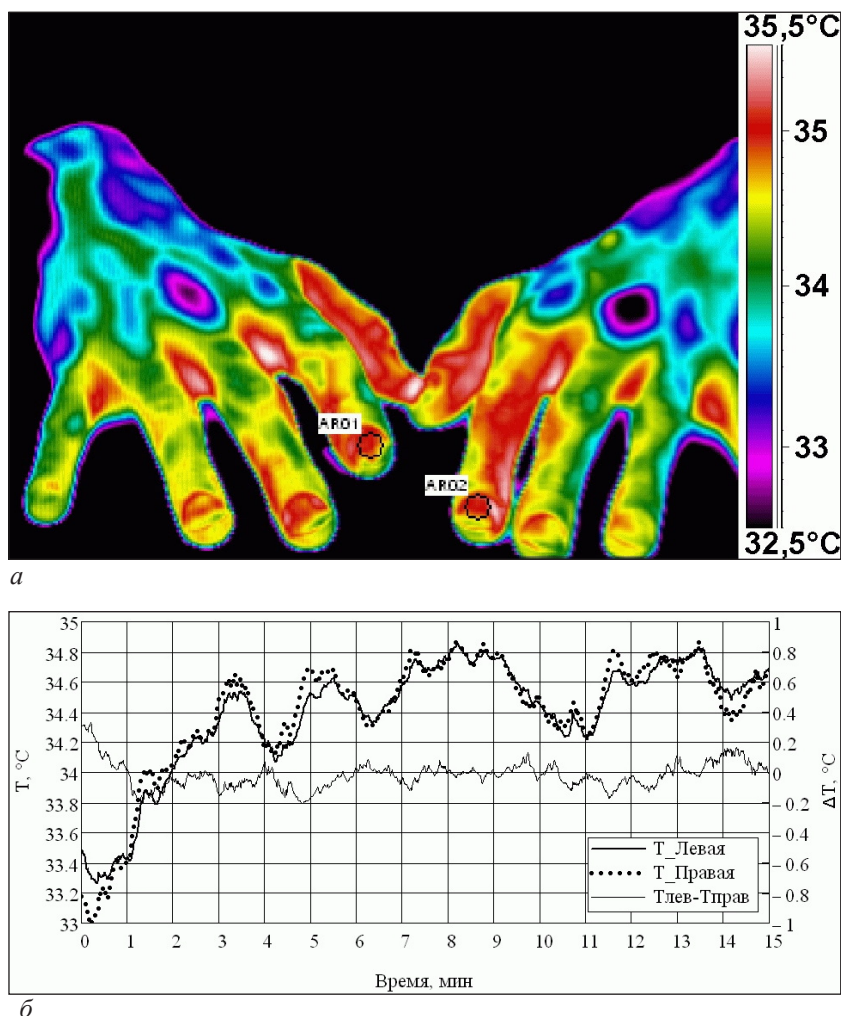


Рис. 1. Синхронность колебаний температуры: а – термограмма кистей; б – динамика температуры фаланги левой кисти (толстая сплошная линия), фаланги правой кисти (точечная линия), разность температур фаланг левой и правой кистей (тонкая сплошная линия)

Fig. 1. Synchronicity of oscillations: а – thermogram of hands; б – dynamics of the temperature of the phalanx of the left hand (thick solid line), phalanges of the right hand (dotted line), temperature difference between the phalanges of the left and right hands (thin solid line)

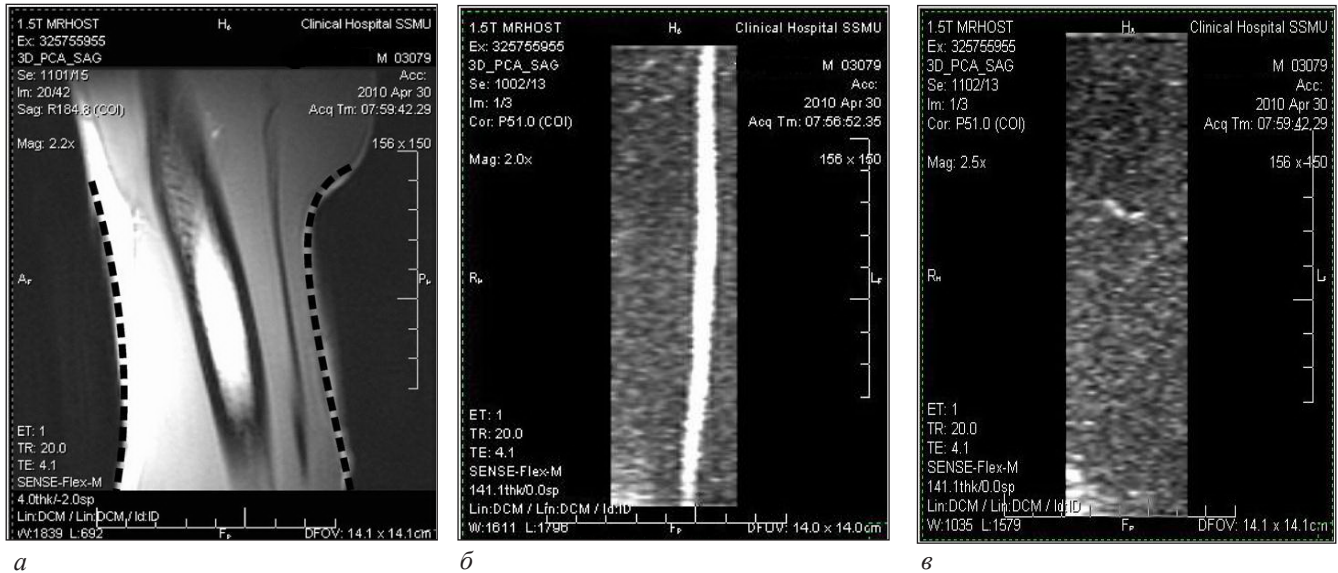


Рис. 2. Магнитно-резонансные томограммы плечевой артерии: *a* – профиль тканей плеча в момент начального увеличения давления манжеты (пунктиром выделен профиль деформации мягких тканей); *б* – плечевая артерия до окклюзии; *в* – плечевая артерия во время окклюзии

Fig. 2. Magnetic resonance tomograms of the brachial artery: *a* – the profile of the shoulder tissues at the moment of initial increase in the pressure of the cuff (the deformation profile of the soft tissues is indicated by the dotted line); *б* – brachial artery before the occlusion; *в* – brachial artery during occlusion

тура в области артерий снижается, температура в области вен растет. Это может происходить вследствие перераспределения тепловой энергии и отдачи тепла артерий к окружающим тканям, а тепла окружающих тканей – к венам. Причиной изменения температуры предплечья во время окклюзии могут быть также сосудистые реакции, в результате которых происходит изменение кровенаполнения артерий и вен.

Для получения дополнительной информации о сосудистых реакциях артерий и вен были проведены ультразвуковые измерения просвета сосудов в В-режиме. Определялось изменение диаметра лучевой артерии и наружной поверхностной вены во время окклюзии. Типичный вид зависимости диаметров артерий и вен от времени показан на рис. 5. В обследованной группе испытуемых во время окклюзии наблюдалось уменьшение сосудистого просвета лучевой артерии и увеличение просвета вены.

Констрикцию лучевой артерии во время окклюзии, по-видимому, можно объяснить активацией механизма местной регуляции кровотока, направленной на повышение тонуса гладкомышечных клеток сосуда в ответ на падение артериовенозной разницы давления, т. е. миогенной реакцией.

Проведенные ультразвуковые доплерографические измерения до и после окклюзии показали, что во всех случаях скорость кровотока в лучевой артерии сразу после снятия окклюзии выше скорости до окклюзии (рис. 6). Это также свидетельствует о том, что во время окклюзии диаметр лучевой артерии уменьшается, так как при ненарушенном кровотоке произведение величины просвета сосуда и линейной скорости кровотока (т. е. объемный кровоток) должно оставаться относительно постоянным.

Результаты приведенных экспериментальных измерений подтверждают предположение о том, что во

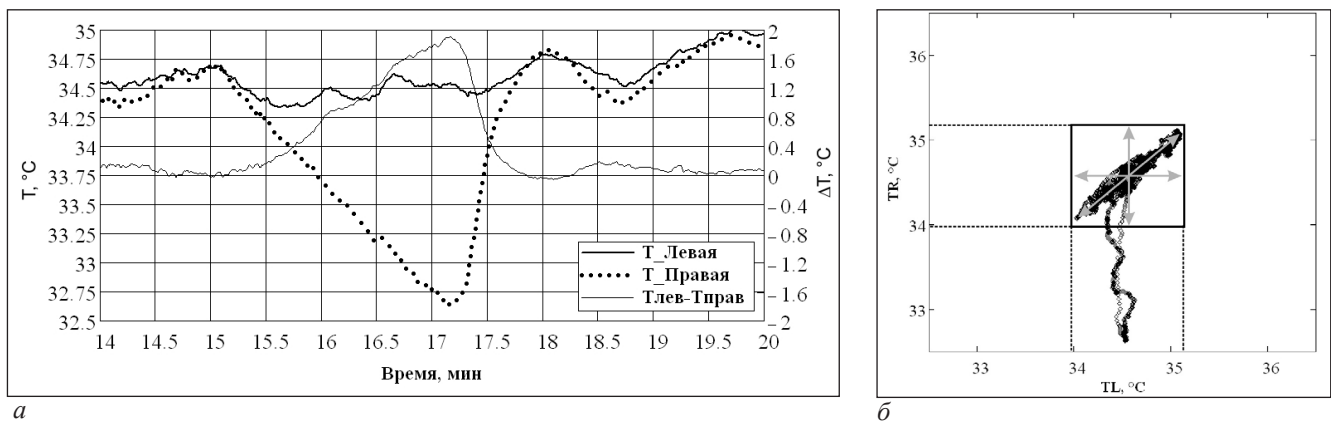
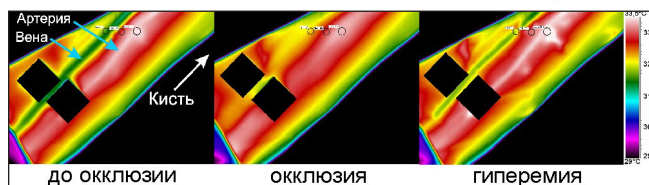
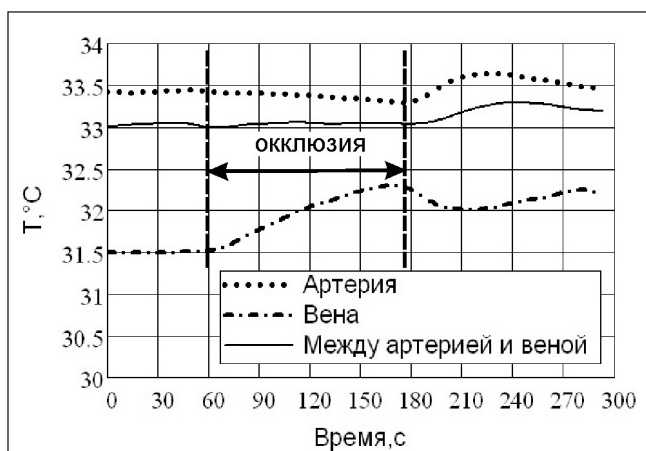


Рис. 3. Окклюзионный период: *a* – динамика температуры фаланг пальцев; *б* – нарушение синхронности колебаний температуры фаланг правой (TR) и левой (TL) рук

Fig. 3. Period of occlusion: *a* – dynamics of finger phalanges temperature; *б* – disturbance of synchronicity of temperature oscillations of phalanx of right (TR) and left (TL) hands



а



б

Рис. 4. Динамика температуры предплечья до, во время и после манжеточной окклюзии в области плеча: а – термограммы предплечья в предокклюзионный, окклюзионный и постокклюзионный периоды (квадратные черные метки ограничивают область над веней); б – изменение температуры зоны над артерией, над веней и между этими зонами

Fig. 4. Dynamics of forearm temperature before, during and after cuff occlusion of the brachial area: а – thermograms of the forearm in the state of before, during and post occlusion (square black marks border the area above the vein); б – change in the temperature of the area above the artery, over the vein and between these areas

время окклюзии из-за высокой эластичности вен и венул основной объем крови накапливается именно в них, а после снятия окклюзии весь накопленный объем крови сразу начинает сбрасываться в венозную систему [8].

Анализ литературных данных, в которых приводились результаты ультразвуковых измерений до и сразу после снятия окклюзии, свидетельствует о наличии сокращения просвета плечевой артерии во время окклюзии [25, 15], что согласуется с результатами данного исследования. Изменение диаметра плечевой артерии во время потокозависимой вазодилатации соотносится с изменением диаметра коронарных артерий [20], таким образом, реакция периферических сосудов на окклюзионную пробу может характеризовать функциональную активность коронарных сосудов.

*Реакция сосудов кисти на плечевую окклюзию.* Анализ фотоплетизмограмм (ФПГ), регистрируемых в области фаланг пальцев, показывает (рис. 7), что после снятия окклюзии наблюдается постепенное увеличение амплитуды пульсовых волн (рис. 7, б),

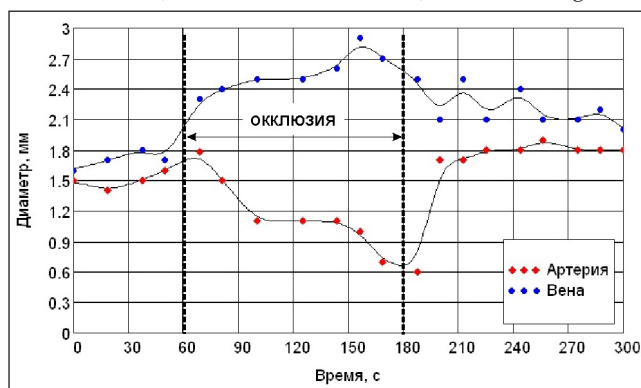


Рис. 5. Изменение диаметра лучевой артерии (ромбовидные маркеры) и наружной поверхностной вены (круглые маркеры) предплечья во время проведения окклюзионной пробы

Fig. 5. Change in diameter of the radial artery (diamond-shaped markers) and external superficial vein (round markers) of the forearm during the occlusion test

при этом амплитуда нескольких первых волн меньше амплитуды волн в предокклюзионный период (рис. 7, а). Таким образом, сразу после снятия окклюзии артерии и артериолы пальцев, по видимому, находятся в состоянии констрикции. Кровь проталкивается в суженные сосуды предплечья и кисти, повышается действующее на стенку сосудов напряжение сдвига, которое стимулирует вазодилатацию с развитием постокклюзионной гиперемии.

Во время самой окклюзии приблизительно в 30 % случаев наблюдались всплески сигнала фотоплетизмограммы, превышающие уровень шума, при этом сигнал температуры имел немономонный вид с наличием локальных подъемов и спадов, накладываются на общую тенденцию к снижению температуры. Указанные явления можно объяснить тем, что даже при полной блокаде кровотока во время окклюзии резкие движения диафрагмы при глубоком вдохе могут спровоцировать сосудистые реакции дистальных отделов ниже области окклюзии [17]. При этом сокращение сосудов и закрытие

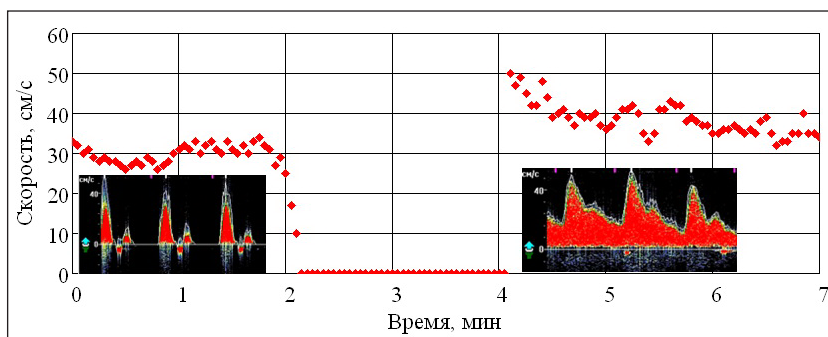


Рис. 6. Динамика пиковой систолической скорости кровотока в лучевой артерии при проведении окклюзионной пробы (на вставках представлены доплерограммы в предокклюзионный и постокклюзионный периоды соответственно)

Fig. 6. Dynamics of peak systolic blood flow velocity in the radial artery during the occlusion test (on the inserts are presented Doppler patterns in the pre-occlusion and post-occlusion periods, respectively)

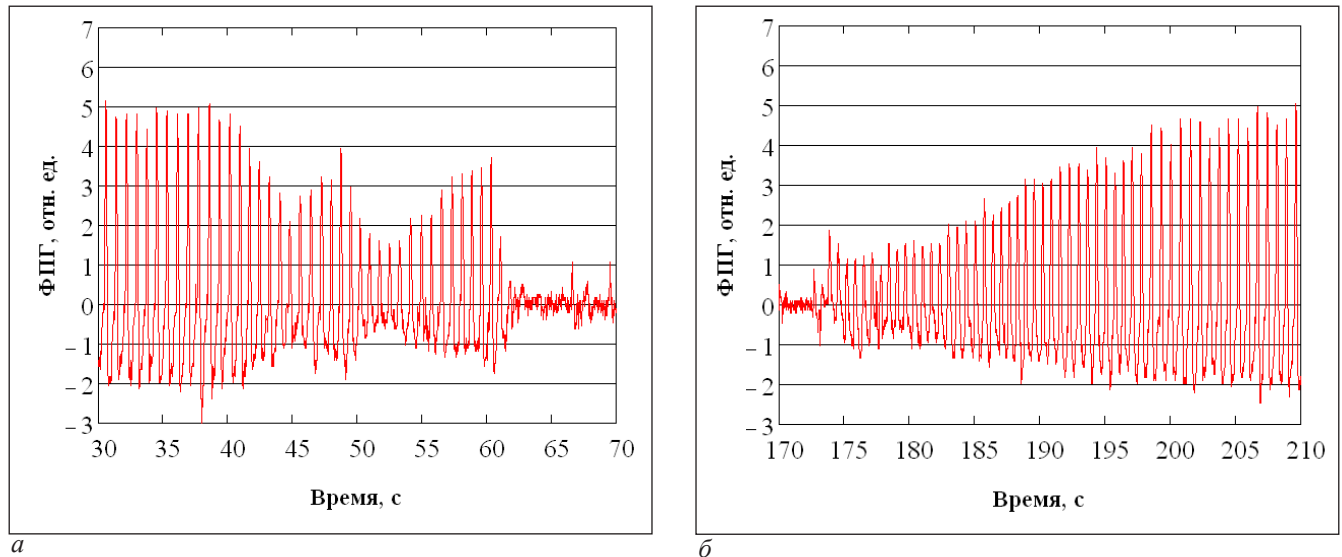


Рис. 7. Фотоплетизмографический сигнал с указательного пальца руки до окклюзии (а) и после снятия окклюзии (б)  
 Fig. 7. Photoplethysmographic signal from the index finger before the occlusion (a) and after the cuff deflation (b)

капилляров пальцев рук приведет к уменьшению их объемной теплоемкости, увеличению скорости остывания и появлению излома на зависимости температуры во время окклюзии. Таким образом,

при проведении окклюзионной пробы с целью исключения влияния дыхательной нагрузки желательнее создавать условия ровного дыхания испытуемого.

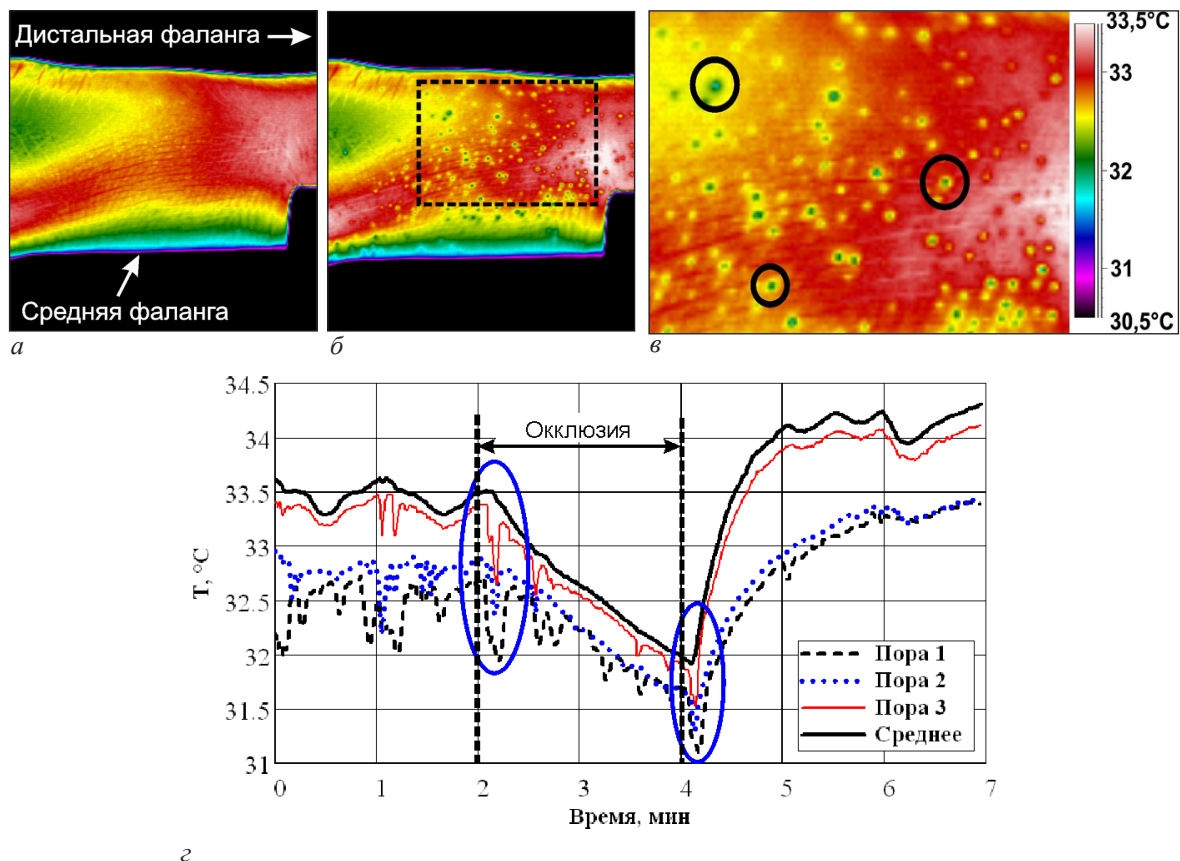


Рис. 8. Реакция единичных потовых каналов пальцев на окклюзионную пробу: а – потовые каналы закрыты; б – потовые каналы открыты; в – увеличенный участок термограммы, выделенный рамкой на рис. б; г – реакция на окклюзию единичных потовых каналов (пор), выделенных кружками на рис. в, и среднее значение температуры фаланги по прямоугольной зоне на рис. б

Fig. 8. Reaction of single finger sweat channels to the occlusion test: a – sweat channels are closed; b – the sweat channels are open; c) an enlarged section of the thermogram, highlighted by a frame in Fig. b; d – reaction to the occlusion of the single sweat channels (pores), isolated by circles in Fig. в, and the average value of the phalanx temperature over the rectangular area in Fig. б

*Реакция единичных потовых каналов на окклюзионную пробу.* Тепловизионная макросъемка с использованием германиевых линз дает возможность наблюдать активность потовых каналов в процессе проведения окклюзионной пробы (рис. 8, а–в). Отслеживание динамики температуры потового канала представляет трудность вследствие микродвижений испытуемого и возможного выхода канала из области интереса. Активация каждого потового канала приводит к появлению области пониженной температуры с локальным минимумом в центре канала. Для регистрации температуры непосредственно в зоне потового канала выбиралась область интереса, превышающая по площади размер потового канала (рис. 8, в), и отслеживалась минимальная температура внутри данной области. Таким образом, производилась запись температуры отдельных пор до, во время и после снятия окклюзии (рис. 8, з).

Проведенные измерения показали наличие синхронной активации потовых каналов у 8 из 14 испытуемых во время создания окклюзии и/или во время снятия окклюзии (рис. 8, з). Также на рис. 8, з заметно отличие средней температуры фаланги (толстая сплошная линия) от температуры кожи в области потовых каналов (пунктирная, точечная и тонкая сплошная линии).

Таким образом, проведенное исследование температурных и гемодинамических явлений в области кисти, плеча и предплечья демонстрирует, что реакция конечности на плечевую окклюзию является комплексной и затрагивает все сосудистые звенья, по крайней мере, ниже области компрессии. Реакцию на окклюзионную пробу можно представить последовательностью состояний I – синхронной динамики температуры и кровотока левой и правой руки до окклюзии; II – нарушением синхронности во время окклюзии вследствие блокирования кровотока и вазоконстрикции артериальных сосудов; III – переходным процессом после снятия окклюзии, сопровождающимся вазодилатацией с постепенным восстановлением синхронности гемодинамики.

Исследование температурной реакции на окклюзию предплечья и кисти в группе здоровых испытуемых выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-75-10130); исследование активности потовых каналов выполнено при поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (проект МК-997.2017.8); доплерографическое исследование скорости кровотока выполнено при поддержке фонда РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00433 мол\_а.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interests.

### Литература / References

1. Воловик М. Г., Киселев Д. В., Полевая С. А. и др. Влияние многократной локальной ишемии на температурный режим и микроциркуляцию кожи кисти у человека // Физиология человека. – 2015. – Т. 41. – № 4. – С. 100–109.

[Volovik MG, Kiselev DV, Aleksandrov NM, Peretyagin PV, et al. Effects of repeated local ischemia on the temperature and microcirculation in the skin of the human hand. *Human Physiology*. 2015. V. 41. № 4. P. 100–109. (In Russ)].

2. Дунаев А. В., Егорова А. В., Жеребцов Е. А., Макаров Д. С. Исследование возможностей тепловидения и методов неинвазивной медицинской спектродофотометрии в функциональной диагностике // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 6–2. – С. 95–100. [Dunaev AV, Egorova AV, Zherebtsov EA, Makarov DS. Issledovanie vozmozhnostei teplovideniya i metodov neinvazivnoi meditsinskoj spektrofotometrii v funktsional'noi diagnostike. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2010; 6-2: 95–100. (In Russ)].

3. Жеребцова А. И., Жеребцов Е. А., Дунаев А. В. и др. Метод и устройство диагностики функционального состояния периферических сосудов верхних конечностей // Медицинская техника. – 2017. – № 1 (301). – С. 33–37. [Zherebtsova AI, Zherebtsov EA, Dunaev AV, Podmasteriev KV, Koskin AV, Pilipenko OV. Metod i ustroystvo diagnostiki funktsional'nogo sostoyaniya perifericheskikh sudov verkhnikh konechnostei. *Meditsinskaya tekhnika*. 2017; 1(301): 33–37. (In Russ)].

4. Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей. – М.: Либроком, 2013. – 496 с. [Krupatkin AI, Sidorov VV. Funktsional'naya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineinost': rukovodstvo dlya vrachei. Moscow: Knizhnyi dom «Librokom», 2013. 496 p. (In Russ)].

5. Протопопов А. А., Усанов Д. А., Аверьянов А. П. и др. Состояние микроциркуляторного русла у детей с сахарным диабетом 1-го типа // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2012. – Т. 11. – № 2. – С. 22–27. [Protopopov AA, Usanov DA, Averyanov AP, Bolotova NV, Skripal AV, Tkacheva Ye N., Sagaidachny AA. The state of microcirculation in children with diabetes mellitus type 1. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2012; 2(11): 22–27. (In Russ)].

6. Сагайдачный А. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Фомин А. В. Метод тепловизионной визуализации колебаний кожного кровотока в конечностях: модификация спектральных составляющих // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2015. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 46–52. [Sagaidachnyi AA, Usanov DA, Skripal AV, Fomin AV. Thermal imaging of the skin blood flow oscillations in extremities: modification of the spectral components. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2015; 1(53): 46–52. (In Russ)].

7. Сагайдачный А. А., Фомин А. В. Анализ временной производной температурной реакции пальцев рук на плечевую окклюзию и ее взаимосвязь с параметрами гемодинамики. // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2017. – Т. 17. – № 3 (63). – С. 31–40. [Sagaidachnyi AA, Fomin AV. Analysis of time derivative of the temperature response of fingers on the brachial occlusion and its relationship with hemodynamic parameters. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2017; 3 (63): 31–40. (In Russ)].

8. Тихонова И. В., Танканаг А. В., Чемерис Н. К. Динамика амплитуд колебаний периферического кровотока в процессе развития постокклюзионной реактивной гиперемии у условно-здоровых добровольцев // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2009. – Т. 8. – № 1 (29). – С. 31–35. [Tikhonova IV, Tankanag AV, Chemeris NK. The investigation of the amplitude dynamics of peripheral blood flow oscillations during postocclusive reactive hyper-

*mia in healthy subjects. Regional hemodynamics and microcirculation.* 2009; 1(29): 31-35. (In Russ)].

9. Усанов Д. А., Сагайдачный А. А., Скрипаль А. В., Фомин А. В. Взаимосвязь колебаний температуры и кровотока пальцев рук // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2012. – Т. 11. – № 2. – С. 37–42. [Usanov DA, Sagaidachnyi AA, Skripal AV, Fomin AV. Interrelation of temperature and blood flow oscillation of fingers. *Regional hemodynamics and microcirculation.* 2012; 2(11): 37-42. (In Russ)].

10. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Протопопов А. А. и др. Оценка функционального состояния кровеносных сосудов по анализу температурной реакции на окклюзионную пробу // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2009. – Т. 5. – № 4. – С. 554–558. [Usanov DA, Skripal AV, Protopopov AA, Sagaidachnyi AA, Rytik AP, Miroshnichenko EV. Estimation of blood vessels functional state by means of analysis of temperature reaction on occlusive test. *Saratov Journal of Medical Scientific Research.* 2009; 5(4): 554-558. (In Russ)].

11. Федорович А. А. Неинвазивная оценка вазомоторной и метаболической функции микрососудистого эндотелия в коже человека // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2013. – Т. 12. – № 2. – С. 15–25 [Fedorovich AA. Non-invasive evaluation of vasomotor and metabolic functions of microvascular endothelium in human skin. *Regional hemodynamics and microcirculation.* 2013; 12(2): 15-25. (In Russ)].

12. Abdul-Ghani S, Fleishman AN, Khaliulin I, Meloni M, Angelini G D, Suleiman MS. Remote ischemic preconditioning triggers changes in autonomic nervous system activity: implications for cardioprotection. *Physiological Reports.* 2017; 5(3). E13085. doi: 10.14814/phy2.13085.

13. Ahmadi N, Hajsadeghi F, Gul K, Vane J, Usman N, Flores F et al. Relations between digital thermal monitoring of vascular function, the Framingham risk score, and coronary artery calcium score. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography.* 2008; 2 (6): 382-388. doi: 10.1016/j.jcct.2008.09.001.

14. Celermajer DS, Sorensen KE, Gooch VM, Spiegelhalter DJ, Miller OI, Sullivan ID et al. Non-invasive detection of endothelial dysfunction in children and adults at risk of atherosclerosis. *The lancet.* 1992; 340(8828): 1111-1115. doi: 10.1016/0140-6736(92)93147-F.

15. Corretti MC, Anderson TJ, Benjamin EJ, Celermajer D, Charbonneau F, Creager MA et al. Guidelines for the ultrasound assessment of endothelial-dependent flow-mediated vasodilation of the brachial artery: a report of the International Brachial Artery Reactivity Task Force. *Journal of the American College of Cardiology.* 2002. 39 (2): 257-265. doi: 10.1016/S0735-1097(01)01746-6.

16. Fronek A, Johansen K, Dilley RB and Bernstein EF. Ultrasonographically monitored postocclusive reactive hyperemia in the diagnosis of peripheral arterial occlusive disease. *Circulation.* 1973. 48 (1): 149-152. doi:10.1161/01.CIR.48.1.149.

17. Mulinos MG, Shulman I. Vasoconstriction in the hand from a deep inspiration. *Am. J. Physiol.* 1939; 125: 310-322.

18. Sagaidachnyi AA, Fomin AV, Usanov DA, Skripal AV. Thermography – based blood flow imaging in human skin of the hands and feet: A Spectral – Filtering Approach. *Physiological*

*measurement.* 2017; 38(2): 272. doi: 10.1088/1361-6579/aa4eaf.

19. Sagaidachnyi AA, Skripal AV, Fomin AV and Usanov DA. Determination of the amplitude and phase relationships between oscillations in skin temperature and photoplethysmography – measured blood flow in fingertips. *Physiological measurement.* 2014; 35(2): 153-166. doi: 10.1088/0967-3334/35/2/153.

20. Takase B, Uehata A, Akima T, Nagai T, Nishioka T, Hamabe A et al. Endothelium-dependent flow-mediated vasodilation in coronary and brachial arteries in suspected coronary artery disease. *American Journal of Cardiology.* 1998; 82(12): 1535-1539. doi: 10.1016/S0002-9149(98)00702-4.

21. Tarján J., Nagy L., Kovács I., Kovács E., Arvai F., and Dobai F. Flow mediated change of finger-tip-temperature in patients with high cardiovascular risk. *Cardiology Hungarica.* 2005; 35: 11-16.

22. Thijssen DH, Black MA, Pyke KE, Padilla J, Atkinson G, Harris RA et al. Assessment of flow-mediated dilation in humans: a methodological and physiological guideline. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology.* 2011; 300(1). H2-H12. doi:10.1152/ajpheart.00471.2010.

23. Tikhonova IV, Tankanag AV and Chemeris NK. Time-amplitude analysis of skin blood flow oscillations during the post-occlusive reactive hyperemia in human. *Micro vascular research.* 2010; 80(1): 58-64. doi: 10.1016/j.mvr.2010.03.010.

24. Vainer B. G., Markel A. L. Systemic vascular response to brachial arteries crossclamping may prognosticate the outcome of remote ischemic preconditioning. *Medical hypotheses.* 2015; 84(4): 298-300. doi: 10.1016/j.mehy.2015.01.013.

25. West S. G. Effect of diet on vascular reactivity: an emerging marker for vascular risk. *Current atherosclerosis reports.* 2001; 3(6): 446-455. doi:10.1007/s11883-001-0034-7.

### Информация об авторах

**Сагайдачный Андрей Александрович** – кандидат физико-математических наук, доцент Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского, e-mail: andsag@yandex.ru.

**Фомин Андрей Владимирович** – кандидат физико-математических наук, ассистент Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского, e-mail: 89050344175@bk.ru.

**Скрипаль Анатолий Владимирович** – профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой медицинской физики Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского, e-mail: SkripalAV@info.sgu.ru.

**Усанов Дмитрий Александрович** – профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики твердого тела Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского, e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru.

### Author information

**Sagaidachnyi Andrey Alexandrovich** – Ph. D., Associate Professor, Saratov State University, e-mail: andsag@yandex.ru.

**Fomin Andrey Vladimirovich** – Assistant, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Saratov State University, e-mail: 89050344175@bk.ru.

**Skripal Anatoly Vladimirovich** – Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Medical Physics, Saratov State University, e-mail: SkripalAV@info.sgu.ru.

**Usanov Dmitry Alexandrovich** – Professor, Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Department of Solid State Physics, Saratov State University. N. G. Chernyshevsky, e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru.