УДК [616.379–008.64:617.58]–072.7

УСАНОВ Д. А., СКРИПАЛЬ А. В., ПОТАХИН С. Н., САГАЙДАЧНЫЙ А. А., ФОМИН А. В., САМСОНОВА А. А.

Тепловизионный анализ характера реакции нижних конечностей на тепловую пробу при наличии сахарного диабета

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского
410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
e-mail: andsag@yandex.ru

Реферат

Цель исследования **— изучение характера температурной реакции нижних конечностей на тепловую пробу при наличии у пациентов трофических расстройств на фоне сахарного диабета и атеросклероза сосудов нижних конечностей.**

Материалы и методы. **Тепловая проба проводилась с использованием электрической грелки в течение 20 минут. Контроль динамики температуры тыла стоп выполнялся с помощью тепловизионной камеры с температурной чувствительностью 0,02°С. В исследовании принимала участие группа испытуемых из 8 человек без сосудистых нарушений в области нижних конечностей и группа пациентов из 8 человек с трофическими нарушениями вследствие прогрессирования сахарного диабета и атеросклероза, возраст пациентов — 67±8 лет. У всех пациентов имел место сахарный диабет 2 типа и атеросклероз сосудов нижних конечностей с разным уровнем и степенью сужения магистральных сосудов. Выраженность трофических расстройств варьировала от апикального некроза и трофических язв до гангрены стопы. Рассчитывались спектральные и амплитудные параметры динамики температуры. Для спектрального анализа использовалось преобразование Фурье.**

Результаты. **По сравнению с группой здоровых испытуемых, температурная реакция конечностей на тепловую пробу у пациентов с сахарным диабетом и нарушением магистрального кровотока характеризуется монотонным характером изменения температуры без ярко выраженных колебаний; снижением амплитуды колебаний температуры в эндотелиальном диапазоне; сравнительно большой разницей средних температур между левой и правой стопой. В группе здоровых испытуемых реакция на тепловую пробу не носит строго двухэтапного характера, связываемого в теории с первичной и вторичной вазодилатацией.**

Выводы. **Устанавливаемое в процессе тепловой пробы снижение амплитуды температурных колебаний эндотелиального диапазона может являться признаком эндотелиальной дисфункции у пациентов с сахарным диабетом 2 типа на фоне атеросклероза сосудов нижних конечностей. Спектральные и температурные параметры реакции конечности на тепловую пробу могут быть использованы для оценки степени трофических расстройств и компенсации механизмов регуляции обменных процессов в группе больных сахарным диабетом.**

Ключевые слова: *тепловидение, термография, тепловая проба, тепловое воздействие, сахарный диабет.*

Введение

В настоящее время динамическое тепловидение находит всё более широкое применение в области медицинской диагностики [2, 7, 15]. Принцип тепловизионной диагностики основан на выявлении областей тела человека, в которых нарушено питание поверхностных тканей кровью, присутствуют структурные нарушения или обнаруживается отклонение временной динамики температуры от нормы. При этом имеется возможность оценки симметрии/асимметрии пространственного распределения температуры или температурной динамики, что является преимуществом по сравнению с такими методами локального анализа кровотока, как лазерная допплеровская флоуметрия и фотоплетизмография.

В процессе сопоставления температурных данных и результатов фотоплетизмографии [8] или лазерной допплеровской флоуметрии [13] обнаруживаются различия формы соответствующих кривых. Как показывают результаты исследования [9], несоответствие формы кривых обусловлено наличием затухания и дисперсии температурного сигнала в поверхностных тканях. Учет влияния дисперсии и затухания открывает возможность визуализации гемодинамических изменений в области конечностей с помощью математической обработки динамических термограмм [5, 10]. Установленная взаимосвязь колебаний температуры и объемного кровотока обеспечивает возможность использования температурных

методов для изучения гемодинамических процессов в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном диапазонах частот.

Нижние конечности тела человека часто страдают вследствие нарушения трофики тканей при прогрессировании сахарного диабета и атеросклероза. Трофические нарушения могут иметь ограниченный характер в виде язв или некроза тканей, требующих некрэктомии или экономных ампутаций. При неблагоприятном течении болезни и невозможности коррекции кровотока развивается гангрена конечности, что завершается ампутацией на уровне бедра нередко с высоким операционно-анестезиологическим риском. Для оценки сохранности механизмов регуляции объемного кровотока в нижних конечностях целесообразно использовать методы функциональной диагностики в процессе лечения пациента. При этом поиск и совершенствование нагрузочных проб, стимулирующих активность периферических сосудов и дающих возможность оценить их функциональные свойства, являются актуальной задачей.

Одним из эффективных методов, активизирующих вазодилатацию периферических сосудов, является тепловая проба [14]. Данная проба применяется, например, при диагностике венозной недостаточности, синдрома Рейно, ангиопатии у больных сахарным диабетом [19].

Целью исследования — является предварительное исследование характера температурной реакции нижних конечностей на тепловую пробу при наличии у пациентов сахарного диабета и трофических нарушений.

Материал и методы исследования

В ходе эксперимента проводилась тепловая проба на нижних конечностях. Нагрев осуществлялся с помощью электрической грелки ИНКОР ОНЭ-1-40/220 в течение 20 минут. Температура нагрева — 38–42 °С. Контроль динамики температуры тыла стоп выполнялся с помощью охлаждаемой тепловизионной камеры ThermaCam SC 3000 Flir Systems (Швеция) с температурной чувствительностью 0,02°С и размером матрицы 320×240 пикселей. В исследовании принимала участие группа испытуемых из 8 человек без сосудистых нарушений в области нижних конечностей и группа пациентов из 8 человек с трофическими нарушениями вследствие прогрессирования сахарного диабета и атеросклероза, возраст пациентов — 67±8 лет.

В процессе анализа термограмм определялась динамика температуры тыла стопы (рис. 1), вычислялись спектральные и температурные показатели. Динамика температуры характеризовалась мощностью колебаний в эндотелиальном и нейрогенном диапазонах, вычисляемой как среднее значение квадратов модуля Фурье-коэффициентов (1) в диапазонах частот (0,005; 0,02) и (0,02; 0,05) Гц соответственно:

$$PD(f) = \left| \int_0^{t_{max}} T(t) \cdot \exp(-j2\pi f t)\, dt \right|^2$$

где t — время; t_{max} — длительность времени наблюдения; T(t) — временная зависимость температуры тыла стопы; f — частота колебаний; j — мнимая единица. Выбор указанных диапазонов обусловлен тем, что основная мощность колебаний температуры сосредоточена в эндотелиальном и нейрогенном диапазонах, в более высокочастотных диапазонах (особенно выше миогенного) происходит сильное затухание температурных колебаний, приводящее к снижению уровня сигнала до уровня шума [6, 9, 13].

Анализируемые сигналы имели вид, представленный на рис. 2. Для определения температурных параметров рассчитывалась абсолютная разность температур тыла левой и правой стоп, усредненная по времени измерения.

Результаты исследования

Средние значения температуры левой и правой стоп приведены в таблице 1 для группы здоровых испытуемых, в таблице 2 — для группы пациентов. Средняя мощность колебаний температуры при проведении тепловой пробы для эндотелиального и нейрогенного диапазонов приведена в таблице 3 для группы здоровых испытуемых, в таблице 4 — для группы пациентов.

Обсуждение результатов

Колебательный и монотонный характер температурной реакции нижних конечностей на тепловую пробу

При отсутствии какой-либо функциональной нагрузки на поверхности стоп наблюдаются колебания температуры настолько низкой амплитуды, что количественный анализ различий между испытуемыми является затруднительным. Как показали проведенные измерения, тепловая нагрузка позволяет активизировать и проявить ритмы сосудистых и порождаемых ими температурных колебаний.

Качественный анализ динамики температуры стоп на тепловую пробу демонстрирует различный характер реакции в группе пациентов и в группе здоровых испытуемых. В группе здоровых испытуемых наблюдается немонотонное возрастание температуры с ярко выраженными колебаниями (рис. 2 а). В группе пациентов с наличием сахарного диабета и нарушениями притока крови, напротив, в ответ на нагрев происходит почти монотонное повышение температуры и колебания температуры едва заметны (рис. 2 б).

Количественный спектральный анализ (табл. 3, 4) показывает, что в группе здоровых испытуемых средняя мощность колебаний температуры эндотелиального диапазона имеет значение 0,06 °С, в группе пациентов с трофическими расстройствами — 0,03 °С, т. е. снижена в 2 раза (рис. 2 в, г).

Анализируя связь колебаний температуры кожи и объемного кровотока, можно сделать вывод о том, что в исследованной группе пациентов с сахарным диабетом на фоне нарушения магистрального кровотока наблюдается снижение амплитуды эндотелиальных колебаний просвета сосудов. Результаты работы [16] подтверждают типичность снижения спонтанных

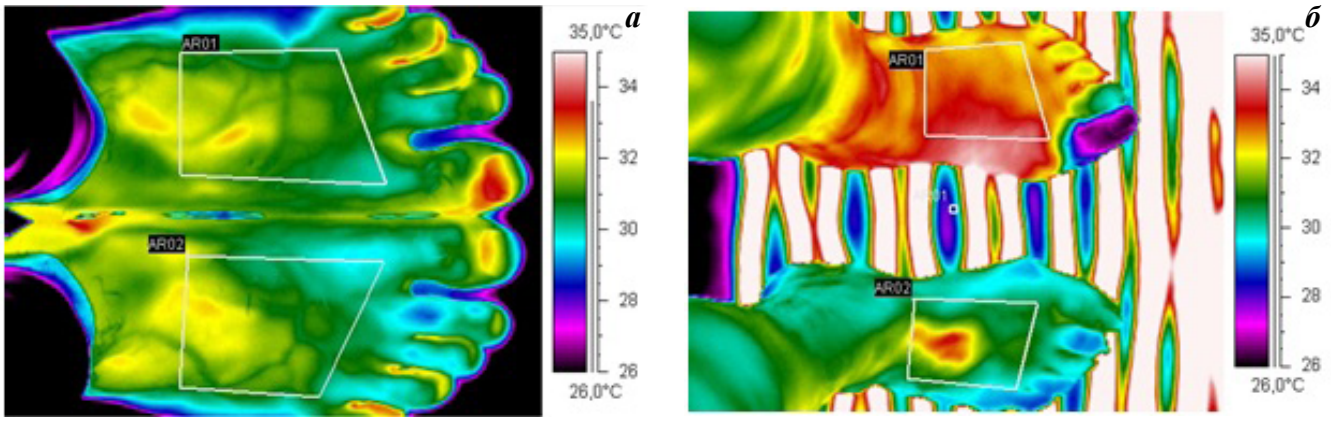

Рис. 1. Термограммы стоп и области, используемые для анализа: а — условно здоровый испытуемый; б — испытуемый из группы пациентов

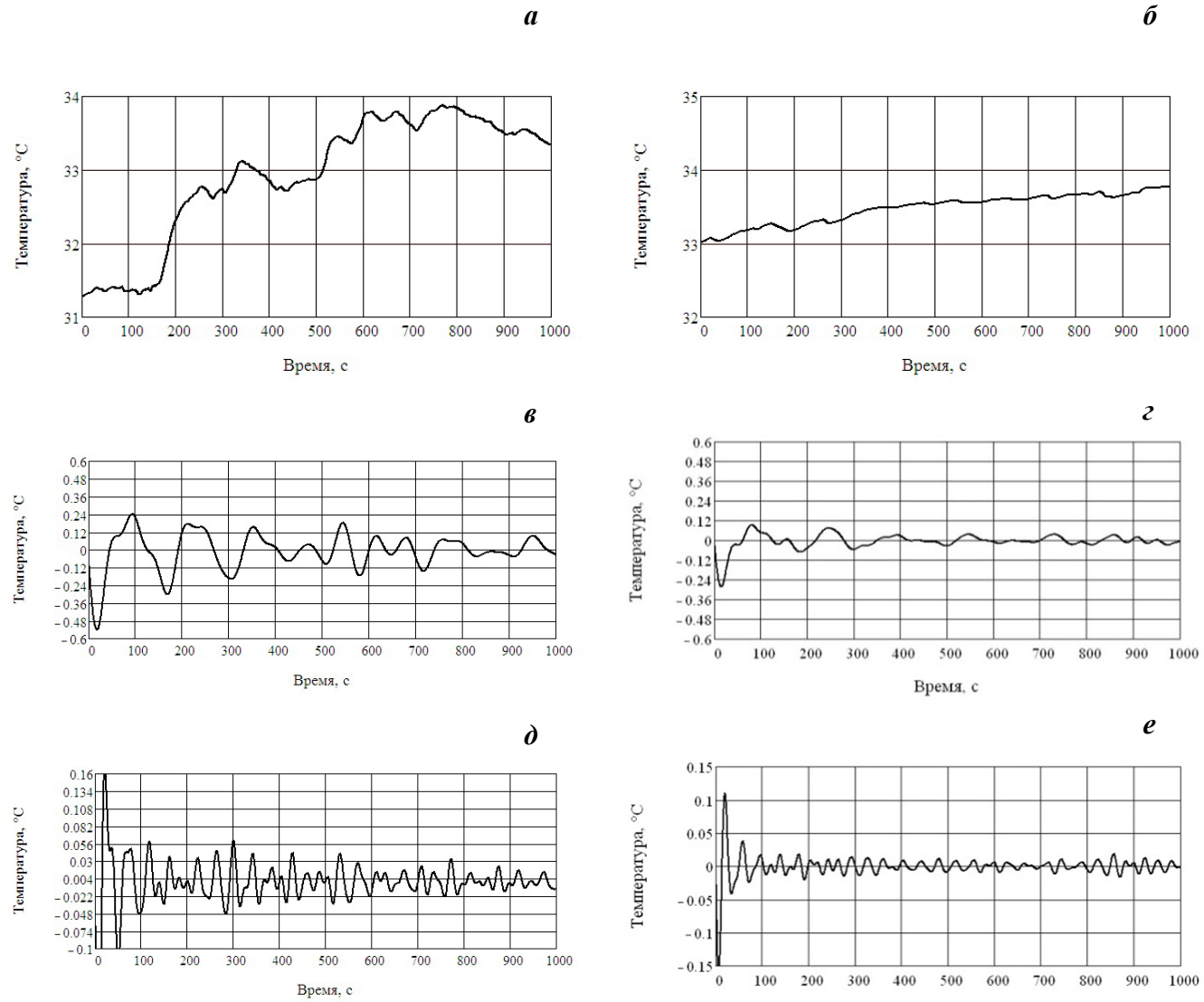

Рис. 2. Типичная временная зависимость температурной реакции нижних конечностей на нагрев для здорового испытуемого (а) для пациента (б) и соответствующие колебания температуры, отфильтрованные в эндотелиальном (0,005–0,02 Гц) (в, г) и нейрогенном (0,02–0,05 Гц) диапазонах (д, е)

Температурные параметры для группы условно здоровых испытуемых

Таблица 1

Испытуемый	T левая, °C	T правая, °C	|ΔT левая–правая|, °C
Испытуемый 1	34,139	33,729	0,41
Испытуемый 2	32,022	32,166	0,144
Испытуемый 3	34,225	33,774	0,451
Испытуемый 4	31,05	30,408	0,642
Испытуемый 5	31,003	31,919	0,916
Испытуемый 6	33,033	33,025	0,008
Испытуемый 7	33,913	32,997	0,916
Испытуемый 8	32,804	32,828	0,024
Среднее значение	32,77	32,61	0,44

Температурные параметры для группы пациентов

Таблица 2

Испытуемый	T левая, °C	T правая, °C	|ΔT левая–правая|, °C
Пациент 1	35,144	33,042	2,102
Пациент 2	33,619	31,433	2,186
Пациент 3	30,533	31,159	0,626
Пациент 4	30,256	31,364	1,108
Пациент 5	31,05	32,279	1,229
Пациент 6	30,881	30,207	0,674
Пациент 7	31,415	33,57	2,155
Пациент 8	30,772	31,005	0,233
Среднее значение	31,71	31,76	1,29

Спектральная мощность колебаний температуры в эндотелиальном и нейрогенном диапазонах для группы условно здоровых испытуемых

Таблица 3

Испытуемый	Спектральная мощность, °C^2			
	Эндотелиальный диапазон (0,005–0,02 Гц)		Нейрогенный диапазон (0,02–0,05 Гц)	
	Левая	Правая	Левая	Правая
Испытуемый 1	0,053	0,049	0,038	0,037
Испытуемый 2	0,073	0,045	0,035	0,023
Испытуемый 3	0,05	0,057	0,023	0,021
Испытуемый 4	0,038	0,095	0,033	0,076
Испытуемый 5	0,105	0,065	0,034	0,024
Испытуемый 6	0,046	0,05	0,021	0,024
Испытуемый 7	0,068	0,059	0,027	0,026
Испытуемый 8	0,082	0,054	0,036	0,034
Среднее значение	0,064	0,059	0,031	0,033

Спектральная мощность колебаний температуры в эндотелиальном и нейрогенном диапазонах для группы пациентов

Таблица 4

Испытуемый	Спектральная мощность, °C^2			
	Эндотелиальный диапазон (0,005–0,02 Гц)		Нейрогенный диапазон (0,02–0,05 Гц)	
	Левая	Правая	Левая	Правая
Испытуемый 1	0,028	0,026	0,025	0,023
Испытуемый 2	0,035	0,029	0,025	0,018
Испытуемый 3	0,04	0,038	0,029	0,025
Испытуемый 4	0,027	0,042	0,016	0,03
Испытуемый 5	0,028	0,014	0,022	0,015
Испытуемый 6	0,015	0,023	0,015	0,018
Испытуемый 7	0,011	0,02	0,016	0,02
Испытуемый 8	0,029	0,03	0,028	0,023
Среднее значение	0,027	0,028	0,022	0,021

ритмических колебаний сосудистого просвета для пациентов с сахарным диабетом. В исследовании [11] установлено, что при проведении холодовой пробы у пациентов с сахарным диабетом 2 типа отсутствует восстановление амплитуд колебаний в эндотелиальном диапазоне частот, что рассматривается как нарушение вазодилатации. При проведении локальной тепловой пробы в группе пациентов с синдромом диабетической стопы отмечается нарушение вазодилатации в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном диапазонах колебаний кровотока [1].

Снижение амплитуды эндотелиальных колебаний в ответ на нагрузку обычно связывают с дисфункцией эндотелия, проявляющейся в нарушении способности эндотелиальных клеток выполнять такие функции, как секреция в необходимых пропорциях вазодилататоров и вазоконстрикторов, веществ, изменяющих вязкость крови, а также нарушение барьерной функции эндотелия [12]. Снижение амплитуды эндотелиальных колебаний при сахарном диабете, выявляемое в процессе проведения тепловой пробы, также может быть связано с дисфункцией эндотелия.

Эндотелиальная дисфункция не специфична только для пациентов с сахарным диабетом. Сахарный диабет является лишь одним из факторов риска возникновения эндотелиальной дисфункции, наряду с высоким уровнем холестерина, низкой физической активностью и высоким артериальным давлением. Однако, при развитии диабетической микроангиопатии эндотелиальная дисфункция предшествует развитию трофических расстройств [17].

Реакция на тепловую пробу

В соответствии с существующими представлениями о реакции на тепловую пробу, выделяют фазу первичной и вторичной вазодилатации. Первичную вазодилатацию связывают с активацией термочувствительных ваниллоидных рецепторов и освобождением нейропептидов из окончаний сенсорных волокон [18].

Более позднюю, вторую фазу вазодилатации связывают с освобождением оксида азота NO из эндотелия сосудов. В соответствии с современными представлениями, нагрев в диапазоне температур от 32°C и выше стимулирует процессы, обусловленные эндотелиальной активностью микрососудов: высвобождается оксид азота, который, воздействуя на гладкомышечные клетки эндотелия, вызывает вторичную вазодилатацию [4]. Как отмечают авторы работы [3], при температурах нагрева 32–39°C амплитуда колебаний эндотелиального диапазона увеличивается в среднем в 2,1 раза.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что в группе здоровых испытуемых реакция на тепловую пробу не носит строго двухэтапного характера, связываемого с первичной и вторичной вазодилатацией. Наблюдается увеличение температуры стоп, носящее колебательный характер, без четкого разделения на 2 фазы.

Средние значения температуры стоп для группы пациентов и здоровых испытуемых в процессе проведения тепловой пробы отличались незначительно (табл. 1, 2). В группе пациентов с наличием сахарного диабета наблюдалось увеличение разности температур между левой и правой стопой (1,29°C у пациентов и 0,44°C у здоровых испытуемых). Данное различие, по всей видимости, обусловлено различной степенью тяжести трофических поражений левой и правой стоп. Одновременно с этим для двух исследованных групп спектральные показатели, характеризующие интенсивность колебаний температуры в эндотелиальном и нейрогенном диапазоне, не отличаются для противоположных конечностей (табл. 3, 4).

Физическое моделирование динамики температуры в процессе проведения тепловой пробы

В ходе данного исследования дополнительно было проведено моделирование тепловых процессов, происходящих во время тепловой пробы в сосудистой ткани. В качестве первоначальной модели сосудистой системы использовалось соединение из резиновых трубок различного диаметра, близких по упругим свойствам к сосудистой ткани (коэффициент Пуассона 0,5, модуль Юнга 0,5 МПа, плотность 1•103 кг/м^3).

С помощью насоса в трубки подавался физиологический раствор с различным содержанием сахара от 0 до 300 г/л. Подача раствора происходила из резервуара порциями с частотой 1 Гц, что соответствовало нормальной частоте сердечных сокращений. Давление, создаваемое в насосе, модулировалось по амплитуде с частотой 0,01 Гц и глубиной модуляции 0,1, что моделировало воздействие на кровоток эндотелиальных колебаний тонуса сосудов. Резервуар с физиологической жидкостью подогревался с использованием электрической плитки. С помощью тепловизора проводилось измерение температуры стенок трубок в процессе толчкообразного нагнетания в них физиологического раствора.

Результаты тепловизионных измерений показали, что изменение концентрации сахара практически не влияет на характер нагрева стенок трубок. Таким образом, в группе пациентов с сахарным диабетом изменение характера нагрева поверхности стоп в сторону монотонной динамики (рис. 2, б), по всей видимости, не следует напрямую связывать с повышенной концентрацией сахара в крови. Из анализа вышеприведенных литературных данных и результатов данного исследования следует, что нарушение температурной реакции стоп на тепловую нагрузку у пациентов с сахарным диабетом действительно связано с нарушением функций эндотелиального слоя клеток артериальных сосудов.

Указанная дисфункция может проявляться как в снижении способности эндотелия вырабатывать вазодилататоры (например, оксид азота), так и в снижении реактивности гладкомышечной стенки сосудов на вырабатываемые вазодилататоры.

Выводы

Таким образом, температурная реакция конечностей на тепловую пробу у пациентов с сахарным диабетом II типа в сочетании с атеросклерозом сосудов нижних конечностей характеризуется:

1) монотонным характером изменения температуры без ярко выраженных колебаний;
2) снижением амплитуды колебаний температуры в эндотелиальном диапазоне (табл. 3 и 4);
3) сравнительно большой разницей средних температур между левой и правой стопой (табл. 1, 2).

Снижение колебаний температуры эндотелиального диапазона может быть связано с дисфункцией эндотелия, не являющейся специфичной для пациентов с сахарным диабетом. Реакция на тепловую пробу в группе здоровых испытуемых и группе пациентов не носит строго двухэтапного характера, связываемого обычно с первичной и вторичной вазодилатацией.

Моделирование динамики температуры кожи показало незначительное влияние повышенной концентрации сахара на результаты тепловой пробы, что может свидетельствовать в пользу дисфункции эндотелия как основной причины наблюдаемых температурных отклонений.

В перспективе температурные и спектральные параметры реакции конечности на тепловую пробу, определяемые методом динамической термографии, должны обеспечить возможность количественной оценки степени трофических расстройств и компенсации механизмов регуляции обменных процессов, что может стать предметом отдельного исследования.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук, проект МК 4204.2015.8 и фонда РФФИ, проект № 16-32-00433.

Литература

1. *Зубарева Н. А., Подтаев С. Ю., Паршаков А. А. Диагностика нарушений вазодилатации микрососудов кожи у больных с синдромом диабетической стопы при проведении локальной тепловой пробы // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2015. № 3 (55). С. 27–33.*
2. *Иваницкий Г. Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине // Успехи физ. наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1293–1320,*
3. *Коняева Т. Н., Красников Г. В., Пискунова Г. М и др. Тепловая проба с линейно нарастающей температурой нагрева в исследованиях механизмов регуляции системы микроциркуляции кожи человека // Вестн. новых мед. технол. 2002. Т. IX. № 4. С. 89–91.*
4. *Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: рук-во для врачей. М.: ЛИБРОКОМ, 2013.*
5. *Пат. РФ № 2546099. МПК A61B 5/01, A61B 5/026. Заявка № 2014104428/14 от 10,02. 2014 / Сагайдачный А. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Фомин А. В. Способ визуализации колебаний кровотока. Опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.*
6. *Подтаев С. Ю., Попов А. В., Морозов М. К., Фрик П. Г. Исследование микроциркуляции крови с помощью вейвлет-анализа колебаний температуры кожи // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2009. № 8 (3). С. 14–20,*
7. *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. № 2. С. 22–27.*
8. *Сагайдачный А. А., Скрипаль А. В., Фомин А. В., Усанов Д. А. Восстановление спектра колебаний кровотока из спектра колебаний температуры пальцев рук, дисперсия температурного сигнала в биоткани // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2013. № 1. С. 76–82.*
9. *Сагайдачный А. А., Скрипаль А. В., Фомин А. В., Усанов Д. А. Методика восстановления фотоплетизмограммы в диапазоне эндотелиальных и нейрогенных колебаний по результатам измерений температуры пальцев рук // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2013. № 3. С. 22–28.*
10. *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. № 1. С. 46–52.

11. Смирнова Е. Н. , Подтаев С. Ю. , Мизева И. А. , Жукова Е. А. Нарушение механизмов вазодилатации у больных сахарным диабетом 2 типа при проведении контралатеральной холодовой пробы // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2012. № 1. С. 30–34

12. Anticogaulant F. The role of endothelium in regulation of blood vessel tone blood flow // Gomal Journal of Medical Sciences. 2003. Vol. 1. № 2.

13. Frick P., Mizeva I., Podtaev S. Skin temperature variations as a tracer of microvessel tone // Biomedical Signal Processing and Control. 2015. Vol. 21. P. 1–7.

14. Kellogg Jr D. L. In vivo mechanisms of cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans during thermoregulatory challenges // Journal of Applied Physiology. 2006. Vol. 100. №. 5. P. 1709–1718.

15. Medical infrared imaging / eds by N. A. Diakides J. D. Bronzino. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, U.S.A. 2008. 448 p.

16. Stansberry K. B., Shapiro S. A., Hill M. A. et al. Impaired peripheral vasomotion in diabetes // Diabetes care. 1996. № 19 (7). P. 715–721.

17. Stehouwer C. D., Lambert J., Donker A. J. M., & van Hinsbergh V. W. Endothelial dysfunction and pathogenesis of diabetic angiopathy // Cardiovascular Research. 1997. № 34 (1). P. 55–68

18. Stephens D. P. et al. Nonnoradrenergic mechanism of reflex cutaneous vasoconstriction in men // American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology. 2001. Vol. 280. № 4. P. H1496–H1504.

19. Vinik A. I. et al. Dermal neurovascular dysfunction in type 2 diabetes // Diabetes Care. 2001. Vol. 24. № 8. P. 1468–1475.

UDK [616.379–008.64:617.58]–072.7

Usanov D. A., Skripal A. V., Potakhin S. N., Sagaidachnyi A. A., Fomin A. V., Samsonova A. A.

Thermography-based analysis of lower limb vascular response to thermal challenge in patients with diabetes mellitus

Saratov State University named after N. G. Chrnyshevsky
410012, Astrakhanskaya str. 83, Saratov, Russia
e-mail: andsag@yandex.ru

Abstract

The aim of the study — thermography-based analysis of lower limb vascular response to thermal impact in patients with trophic disorders, diabetes mellitus and peripheral atherosclerosis.

Materials and methods. **Thermal impact was carried out using the heating pad acting for 20 minutes. Control of temperature of back of the feet was performed by thermal imaging camera with a thermal sensitivity of 0,02 °C. The study involved a group of 8 subjects without vascular disorders of the lower limbs (controls), and patient group of 8 subjects with trophic disorders due to the progression of diabetes and atherosclerosis (age of 67 ± 8 years). All patients had type 2 diabetes and peripheral arterial disease with different levels and the degree of the main arterial occlusion. Intensity of trophic disorders changed from apical necrosis and trophic ulcers to gangrene of the foot. We calculated spectral amplitude parameters and temperature dynamics. Fourier transform was used to perform spectral analysis of temperature data.**

Results. **Temperature response of limbs in patients with diabetes compared with healthy subjects was characterized by monotonous temperature variation without distinct oscillations; reduction in amplitude of oscillations within endothelial temperature range; relatively high average temperature difference between the left and right foot. In the group of healthy subjects reaction on thermal impact is not strictly two-stage, usually interpretable by theory as primary and secondary vasodilation.**

Conclusions. **Decrease of temperature amplitude of endothelial range registered during thermal impact can be the sign of endothelial dysfunction in patients with diabetes and peripheral arterial disease. Spectral and temperature characteristics of reaction of limbs on thermal impact can be used to assess trophic disorders and compensation mechanisms of regulation of metabolic processes in the group of patients with diabetes mellitus.**

Keywords: *thermal imaging, thermography, thermal test, thermal impact, diabetes mellitus.*

References

1. Zubareva N.A., Podtaev S.YU., Parshakov A.A. Diagnostika narushenij vazodilatacii mikrososudov kozhi u bol'nyh s sindromom diabeticheskoj stopy pri provedenii lokal'noj teplovoj proby // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. 2015. №3 (55). S. 27 – 33. [In Russian].

2. Ivanickij G. R. Sovremennoe matrichnoe teplovidenie v biomedicine //Uspekhi fizicheskih nauk. 2006. T. 176. №. 12. S. 1293-1320, [In Russian].

3. Konyaeva T.N., Krasnikov G.V., Piskunova G.M., Sidorov V.V., Tankanag A.B., CHemeris N.K. Teplovaya proba s linejno narastayushchej temperaturoj nagreva v issledovaniyah mekhanizmov regulyacii sistemy mikrocirkulyacii kozhi cheloveka // Vestnik novyh medicinskih tekhnologij. 2002. T. IX. № 4. S. 89-91. [In Russian].

4. Krupatkin A. I., Sidorov V. V. Funkcional'naya diagnostika sostoyaniya mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem:

kolebaniya, informaciya, nelinejnost': rukovodstvo dlya vrachej // M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM. 2013. [In Russian].

5. Patent RF № 2546099. MPK A61B 5/01, A61B 5/026. Zayavka № 2014104428/14 ot 10,02.2014. Opublikovano 10,04.2015, Byul. № 10, Sagajdachnyj A.A., Usanov D.A., Skripal' A.V., Fomin A.V. Sposob vizualizacii kolebanij krovotoka. [In Russian].

6. Podtaev, S. YU., Popov, A. V., Morozov, M. K., Frik, P. G. Issledovanie mikrocirkulyacii krovi s pomoshch'yu vejvlet-analiza kolebanij temperatury kozhi // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. 2009. 8(3). 14-20,[In Russian].

7. Protopopov A.A., Usanov D.A., Aver'yanov A.P., Bolotova N.V., Skripal'A.V., Tkacheva E.N., Sagajdachnyj A.A. Sostoyanie mikrocirkulyatornogo rusla u detej s saharnym diabetom 1-go tipa // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. 2012. №2. S. 22-27. [In Russian].

8. Sagajdachnyj A.A., Skripal'A.V., Fomin A.V., Usanov D.A. Vosstanovlenie spektra kolebanij krovotoka iz spektra kolebanij temperatury pal'cev ruk, dispersiya temperaturnogo signala v biotkani // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. 2013. №1. S. 76 – 82. [In Russian].

9. Sagajdachnyj A.A., Skripal' A.V., Fomin A.V., Usanov D.A. Metodika vosstanovleniya fotopletizmogrammy v diapazone ehndotelial'nyh i nejrogennyh kolebanij po rezul'tatam izmerenij temperatury pal'cev ruk // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. 2013. №3. S. 22 – 28. [In Russian].

10. Sagajdachnyj A.A., Usanov D.A., Skripal'A.V., Fomin A.V. Metod teplovizionnoj vizualizacii kolebanij kozhnogo krovotoka v konechnostyah: modifikaciya spektral'nyh sostavlyayushchih // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. 2015. №1. S. 46 – 52. [In Russian].

11. Smirnova E.N., Podtaev S.YU., Mizeva I.A., ZHukova E.A. Narushenie mekhanizmov vazodilatacii u bol'nyh saharnym diabetom 2 tipa pri provedenii kontralateral'noj holodovoj proby // Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya. 2012. № 1. S.30-34. [In Russian].

12. Anticogaulant F. The role of endothelium in regulation of blood vessel tone blood flow // Gomal Journal of Medical Sciences. 2003. Vol. 1. № 2

13. Frick P., Mizeva I., Podtaev S. Skin temperature variations as a tracer of microvessel tone // Biomedical Signal Processing and Control. 2015. T. 21. C. 1-7.

14. Kellogg Jr D. L. In vivo mechanisms of cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans during thermoregulatory challenges // Journal of Applied Physiology. 2006. T. 100, №. 5. C. 1709-1718

15. Medical infrared imaging / Edited by N. A. Diakides J. D. Bronzino. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, U.S.A. 2008. 448 p.

16. Stansberry K. B., Shapiro S. A., Hill M. A., McNitt P. M., Meyer M. D., & Vinik A. I. Impaired peripheral vasomotion in diabetes. Diabetes care. 1996. 19(7). 715-721.

17. Stehouwer C. D., Lambert J., Donker A. J. M., & van Hinsbergh V. W. Endothelial dysfunction and pathogenesis of diabetic angiopathy. Cardiovascular Research. 1997. 34(1). 55-68

18. Stephens D. P. et al. Nonnoradrenergic mechanism of reflex cutaneous vasoconstriction in men // American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology. 2001. T. 280, № 4. C. H1496-H1504.

19. Vinik A. I. et al. Dermal neurovascular dysfunction in type 2 diabetes // Diabetes Care. 2001. T. 24. №. 8. C. 1468-1475.