

Тепловизионный анализ variability температуры конечностей в состоянии покоя и в процессе проведения окклюзионной пробы

Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А.
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Средствами дистанционной термографии дальнего ИК диапазона исследована динамика температуры в процессе проведения окклюзионной пробы для контрольной группы и группы с нарушениями периферической сосудистой регуляции. Показано, что по сравнению с контрольной группой в случае сосудистых нарушений наблюдается снижение исходной температуры, снижение разностей исходной и минимальной, максимальной и минимальной, исходной и максимальной температур, снижение скорости увеличения температуры после снятия окклюзии. С помощью быстрого преобразования Фурье выделены спектральные характеристики колебаний температуры в покое, проанализирован процесс восстановления ритма колебаний температуры после снятия окклюзии. Преобладающие компоненты в спектре variability температуры сосредоточены в диапазоне 0.003-0.006 Гц. Проанализированы возможные связи ритма колебаний температуры с физиологическими процессами, регулирующими периферическую гемодинамику. Выявленные особенности температурной реакции на окклюзионную пробу и характер колебаний температуры могут служить диагностическим критерием для оценки функционального состояния периферических кровеносных сосудов.

Введение

При разработке методов функциональной диагностики регуляторных систем биологического объекта в первую очередь следует обращать внимание на нестабильные параметры, значения которых наиболее чувствительны к воздействию внешних и внутренних факторов.

Одним из таких параметров является температура тела человека, которая имеет неоднородное поверхностное и объемное распределение, связанное с различным уровнем кровоснабжения и различной интенсивностью протекания обменных процессов. При изменении температуры, влажности окружающей среды система терморегуляции человека поддерживает постоянство температуры ядра тела за счет регуляции температуры периферических отделов, определяемой преимущественно уровнем их кровенаполнения. Функция перераспределения объемов крови между периферией и ядром тела осуществляется за счет развитой системы нервного и гуморального управления тонусом сосудов конечностей, с чем связано изменение поверхностной температуры. Контроль температуры поверхности конечностей часто используется в процессе проведения нагрузочных тестов, целью которых является выявление нормальных и патологических особенностей сосудистой регуляции. Одним из таких тестов является окклюзионная проба [1].

В данной работе тепловизионным методом исследуется динамика температуры фаланг верхних конечностей в покое и в процессе проведения окклюзионной пробы. Целью исследований является выделение температурных характеристик, описывающих осуществление физиологических регуляторных функций в случае нормы и патологии и разработка диагностических методов, основанных на таких характеристиках.

Материалы и методы

Бесконтактные наблюдения температурных изменений на поверхности кисти осуществлялись с использованием тепловизионной камеры ThermaCAM SC3000 фирмы FLIR Systems с температурной чувствительностью 0.02 °С и разрешением ИК - матрицы 320×240 пикселей, работающей в диапазоне длин волн 8-9 мкм. Спектральный диапазон, используемый камерой, выгоден тем, что вблизи него находится максимум излучательной способности тела человека.

Проводились исследования контрольной группы из 10 человек и группы из 15 пациентов с нарушениями вегетативной регуляции сосудов, сочетающейся с недифференцированной дисплазией соединительной ткани (НДСТ). За сутки до наблюдений пациентам рекомендовалось отказаться от употребления тонизирующих напитков и приема вазоактивных препаратов. Перед проведением окклюзионной пробы пациент адаптировался к комнатным условиям в течение 15-20 минут. Измерялось артериальное давление пациента, с целью определить значение давления манжеты необходимое для создания окклюзии конечностей.

Для проведения окклюзионного теста рука пациента фиксировалась на поверхности с малой теплоемкостью ладонью вверх, в области плеча располагалась манжета. Окклюзия осуществлялась созданием давления в манжете выше систолического на 30 мм. рт. ст. Тепловизионная запись кисти руки со стороны ладони проводилась в предокклюзионный, окклюзионный и постокклюзионный периоды с длительностями 30 с, 120 с и 120 с соответственно. Затем на записанной термограмме выделялись области дистальных фаланг пальцев и строились зависимости средней температуры выделенных областей от времени теста, определялись уровни исходной, минимальной, максимальной температур, скорость возрастания температуры в постокклюзионный период.

Для исследования variability температуры в группе условно здоровых испытуемых выполнялись записи термограмм тыльной стороны обеих кистей в состояниях физиологического покоя, окклюзии одной из конечностей и восстановления. Длительности непрерывной записи в состоянии покоя 17 мин, окклюзии – 2 мин и восстановления – 17 мин. С использованием быстрого преобразования Фурье строились спектры колебаний температуры дистальных фаланг обеих рук в состоянии покоя, анализировался процесс постановления температуры после снятия окклюзии.

Полученные результаты

Характерный вид зависимостей температуры дистальных фаланг от времени теста для контрольной группы приведен на рисунке 2 а, для случая патологии, связанной с нарушениями вегетативной регуляции тонуса сосудов - на рисунке 2 б .

Полученные зависимости можно описывать, вводя следующие параметры: T_1 - исходный уровень температуры, T_2 – минимальная температура, достигаемая в окклюзионный период, T_3 – температура первого максимального уровня температуры в постокклюзионный период, $V_{2,3}$ - средняя скорость возрастания температуры в постокклюзионный период, $t_{2,3}$ - время изменения температуры от T_2 до T_3 . В таблице приведены измеренные параметры для пациентов с НДСТ и контрольной группы.

В таблице данные представлены в виде «среднее значение \pm среднее квадратичное отклонение». Здесь n – количество испытуемых в группе, $\Delta T_{1,2} = T_1 - T_2$; $\Delta T_{1,3} = T_3 - T_1$;

$$\Delta T_{2,3} = T_3 - T_2; V_{2,3} = (T_3 - T_2) / t_{2,3}.$$

В случае сосудистых нарушений данные таблицы показывают сниженный уровень исходной, минимальной и максимальной температур по сравнению с контролем. Также снижена скорость изменения температуры в постокклюзионный период - $V_{2,3}$ и динамика температуры в окклюзионный и постокклюзионный периоды (параметры $\Delta T_{1,2}$, $\Delta T_{2,3}$), значение максимальной температуры в постокклюзионный период ниже исходной температуры (параметр $\Delta T_{1,3}$).

Отдельно у контрольной группы проводилась регистрация температуры дистальных фаланг в течение 17 минут в состоянии физиологического покоя. Измерения показали наличие колебательного характера температуры. Наиболее типичные зависимости приведены на рис. 2 а, в. Справа от временных зависимостей температуры приведены спектры мощности колебаний рис. 2 б, г, полученные с использованием быстрого преобразования Фурье.

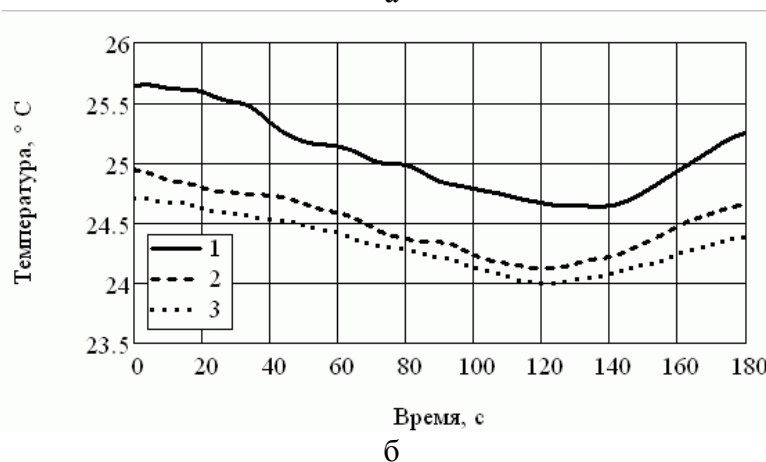
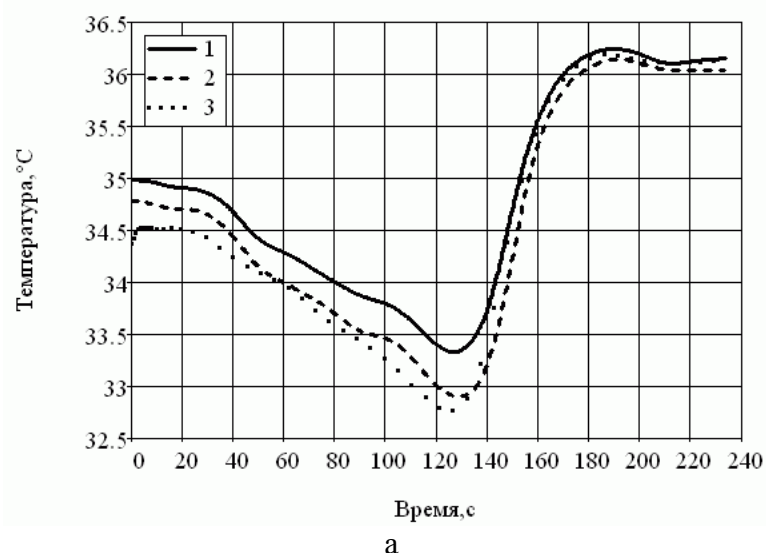


Рис. 1 Типичный вид временной зависимостей температуры, для дистальных фаланг пальцев в процессе проведения окклюзионной пробы для пациентов без диагностированных сосудистых нарушений – а, и пациентов с нарушением сосудистой регуляции сочетающейся с НДСТ - б. Температурные кривые 1- для безымянного пальца, 2- для среднего пальца, 3- для указательного пальца.

Таблица 1.

Температурные характеристики зависимостей, полученных в процессе проведения окклюзионной пробы.

	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{1,2}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{1,3}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{2,3}, ^\circ\text{C}$	$V_{2,3}, ^\circ\text{C}/\text{с}$
Контрольная группа (n=10)	$32,49 \pm 2,42$	$30,92 \pm 2,58$	$34,38 \pm 1,36$	$1,57 \pm 0,49$	$1,9 \pm 1,42$	$3,46 \pm 1,66$	$0,056 \pm 0,019$
Пациенты с НДСТ (n=15)	$27,47 \pm 3,54$	$26,32 \pm 3,02$	$27,06 \pm 3,32$	$1,14 \pm 0,8$	$-0,4 \pm 0,88$	$0,73 \pm 0,88$	$0,02 \pm 0,033$

Спектры вариабельности температуры показали, что основная мощность спектра сосредоточена в области менее 0.05 Гц. Данная частотная область содержит диапазон эндотелиальных колебаний 0.0095 – 0.02 Гц и нейрогенных колебаний 0.02 – 0.05 Гц (2, стр. 19-21). Полученные спектры вариабельности температуры содержат менее выраженный пик на частотах около 0.01 Гц – центральная частота эндотелиальных колебаний и пик с наиболее выделяющейся амплитудой в диапазоне 0.003 – 0.006 Гц с центральной частотой 0.004 Гц (см. рис 2 б, г).

Среди полученных временных зависимостей температуры встречалось в основном две разновидности - с постоянным (рис. 2 а) или с медленно флуктуирующим (рис. 2 б) сред-

ним уровнем температуры. Амплитуда пульсаций имела значения 0.2 – 0.8 °С. Для каждого испытуемого наблюдались синхронные колебания температуры фаланг пальцев на противоположных конечностях. Во время создания окклюзии на одной из конечностей синхронность колебаний её температуры с колебаниями на противоположной конечности нарушалась, после снятия окклюзии в течение 1.5 – 3 мин. происходило восстановление синхронности колебаний температуры на двух конечностях. У четырех из десяти условно здоровых испытуемых характер колебаний температуры свободной конечности не изменялся при создании окклюзии на противоположной конечности. В остальных случаях наблюдалось изменение вида колебаний температуры и на свободной конечности.

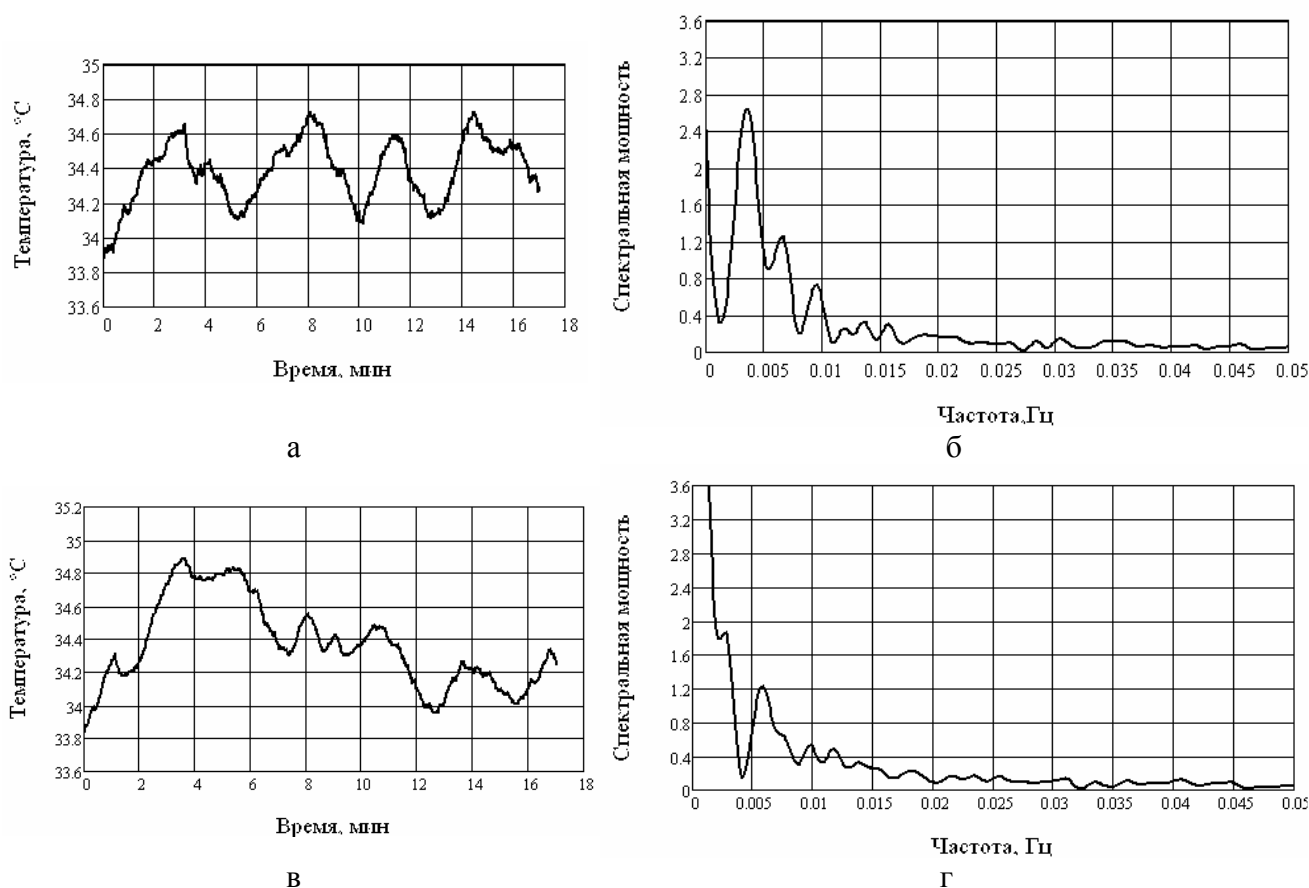


Рис. 2. Временные зависимости температуры (а, в) и соответствующие Фурье - спектры сигнала (б, г), полученные с безымянного пальца.

Тепловизионная съемка фаланг кисти с использованием макрообъектива показала, что колебания температуры фаланг ранее всего возникают в зоне проекции пальцевых артерии на поверхность кожи и диффузно распространяются в окружающие ткани, зона пальцевых артерий имеет максимальную температуру.

Обсуждение результатов

Окклюзионная проба с регистрацией температуры

Проведение окклюзионной пробы начинается с измерения исходного уровня температуры при нулевом давлении в манжете. Значение температуры конечностей в состоянии покоя не постоянно даже при постоянстве внешних условий и достойно отдельного обсуждения, приводимого ниже в отдельной рубрике.

Результаты окклюзионной пробы удобно анализировать, рассматривая последовательно предокклюзионный, окклюзионный и постокклюзионный периоды.

Рассмотрим временную зависимость для испытуемых, состояние сосудистой системы которых можно отнести к соответствующему норме (рис 1 а).

При переходе от состояния покоя к состоянию окклюзии кровотока колебательный характер изменения температуры сменяется её монотонным уменьшением. Окклюзия прерывает как артериальный приток, так и венозный отток крови. При постепенном повышении давления манжеты на плечо первыми перекрываются поверхностные вены, кровоток в артериях перекрывается позже при достижении давления выше систолического. Следовательно, при создании окклюзии будет происходить избыточное накопление крови в венах и повышаться венозное давление. При повышении венозного давления кровоток через большинство капилляров фаланг пальцев прекращается вследствие закрытия прекапиллярных сфинктеров, что в нормальных условиях предотвращает развитие отека [1, стр. 95]. Происходит сокращение диаметра сосудов ретроградно от артериол к более крупным артериям. Данные процессы приводят к понижению температуры дистальных фаланг во время окклюзии (рис. 1 а).

В период окклюзии температура и влажность (теплопроводность) окружающей среды могут влиять на изменение температуры фаланг пальцев за счет естественного выравнивания температур, но воздействие этого процесса выражено менее существенно, чем влияние перераспределения крови по сосудам.

В постокклюзионный период нормальная реакция характеризуется, развитием постокклюзионной гиперемии - избыточного заполнения расширенных артерий, артериол и капилляров нагретой артериальной кровью. Возникновение гиперемии объясняется тем, что во время окклюзии происходит переход метаболизма на анаэробные процессы с образованием лактата, накоплением углекислоты, и других продуктов метаболизма, оказывающих вазодилататорное воздействие [2, 3]. При снятии внешнего давления манжеты артериальное русло конечностей быстро заполняется свежей кровью, что в случае нормы, проявляется в виде резкого повышения температуры выше исходного уровня (рис 1 а) и описывается параметрами $\Delta T_{1,3}, V_{2,3}$. В процессе развития постокклюзионной гиперемии важную роль играет эндотелий сосудов, опосредующий вазодилататорное воздействие продуктов нарушенного метаболизма [1, стр. 44]. Эндотелий сосудистой стенки реагирует на механическое воздействие кровотока, которое создается в продольном и поперечном направлениях. Такое воздействие присутствует во время открытия кровотока после снятия окклюзии. Реакция эндотелия на механическое воздействие заключается в выделении вазодилататоров, в основном оксида азота NO [1, стр. 45], концентрация выделяемых эндотелием веществ и его реактивность оказывают влияние на тонус периферических сосудов и, следовательно, на динамику температуры конечностей.

После достижения максимального уровня температуры в постокклюзионный период не наблюдается резкого её спада до исходного уровня, в отличие от полного спада в течение приблизительно 2 мин показателя микроциркуляции, измеряемого в ходе проведения окклюзионной пробы методом лазерной доплеровской флоуметрии (см. напр. [2]).

В случае патологии вид зависимостей на рис. 1 б демонстрирует слабую температурную реакцию на окклюзию, что может быть следствием нарушения вегетативной сосудистой регуляции у данной группы пациентов и наиболее явно описывается параметром $\Delta T_{1,2}$, представленным в таблице.

В случае сосудистых патологий (рис. 1 б) постокклюзионный период характеризуется низкой скоростью изменения температуры (параметр $V_{2,3}$), одной из причин этого может быть снижение эндотелий зависимой вазодилатации.

Измерения температуры различных пальцев кисти в ходе окклюзионной пробы, показали, что характер кривых для каждого пальца может быть различным. Возможно, это связано с индивидуальными особенностями кровоснабжения пальцев или особенностями иннервации кисти локтевым и срединным нервами.

Вариабельность температуры в состоянии покоя

Исследование колебаний температуры конечностей и выяснение их связи с вазомоторной активностью артерий и артериол является предметом интереса для многих научных

групп. Наиболее ранние исследования variability температуры были проведены Бартоном и Тейлором в 1938 - 1940 годах, которые контактным способом измеряли колебания температуры и давления в конечностях [5].

Наши исследования показали наличие в ультранизкочастотном диапазоне спектральных компонент 0.003 – 0.006 Гц (5.6 - 2,8 мин). Наиболее выделяющаяся частота соответствует периоду колебаний около 4 мин. Колебания происходят синхронно на двух конечностях. Полученные данные согласуются с результатами единичной тепловизионной регистрацией колебаний температуры верхних конечностей с периодом около 3 мин [6]. Синхронность изменения температуры на противоположных конечностях свидетельствует об участии центральной системы терморегуляции [6]. Флуктуация тонуса верхних и нижних конечностей хорошо скоррелирована [5], что позволяет предполагать наличие корреляции колебаний температуры пальцев верхних и нижних конечностей.

Подобные результаты были получены японскими учеными, определявшими спектр колебаний температуры в каждой точке термограммы [7]. Ими показано, что наибольшая амплитуда колебаний температуры с частотой 0.004- 0.005 Гц наблюдается на пальцах кистей и значительно меньшие амплитуды таких колебаний на тыльной стороне кисти.

Анализ вида спектров колебаний температуры, приведенных на рис. 2 б, г показывает быстрое уменьшение амплитуды спектральных компонент при увеличении частоты. Если предполагать, что причиной колебания температуры на поверхности кожи является изменение объемного кровенаполнения сосудов, то данная особенность спектров может объясняться экспоненциальной зависимостью коэффициента затухания от частоты, как было экспериментально показано в [8]. Там же показана высокая степень корреляции колебаний температуры и колебаний кровотока, измеряемого лазерным доплеровским флоуметром особенно в диапазоне нейрогенных и эндотелиальных колебаний с периодом более 20 сек. Для частот более 0.14 Гц амплитуда колебаний температуры на поверхности кожи сопоставима с амплитудой тепловых флуктуаций окружающей среды [8]. Последнее может стать принципиальным ограничением для определения спектра колебаний кровотока в сосудах с периодом менее 7 с на основе измерений колебаний температуры. Такие колебания обычно связывают с влияниями процессов дыхания и сердцебиения.

Измерения температуры на дистальных фалангах верхних конечностей оказывается выгодным по нескольким причинам. Выступающее положение пальцев и относительно низкое содержание в них жировой ткани не допускает сильной диссипации тепла, переносимого кровью от артерий к поверхности кожи и окружающим тканям. Пальцы кисти снабжены пальцевыми артериями, имеющие мелкие веточки в области дистальных фаланг [9, стр. 304], это ускоряет теплоперенос от крови к поверхности кожи, позволяя косвенно наблюдать динамические явления в артериях, артериолах и капиллярах, основываясь на данных о температуре. Учитывая экспоненциальное затухание амплитуды колебаний температуры для анализа более высокочастотных компонент необходимо выбирать зоны с высокой амплитудой колебаний температуры подкожного теплового источника (кровеносного сосуда) в сочетании с наиболее близким к поверхности анатомическим расположением сосуда. Этим условиям удовлетворяет зона пальцевых артерий, в которой, как показали результаты наших экспериментов, регистрируется максимальная температура фаланг пальцев с высокой амплитудой колебаний.

Управление тонусом кровеносных сосудов конечностей играет важную роль как для поддержания адекватного клеточного кровотока, так и при осуществлении терморегуляции организма человека. Симпатическая нервная активность, является одним из основных регуляторов тонуса сосудов, проявляется в виде непрерывных ритмических сокращений или расслаблений сосудистой стенки [4]. При создании окклюзии в соответствующей конечности происходит смена колебательного характера изменения температуры на монотонное уменьшение. После снятия окклюзии происходит монотонное увеличение температуры, сменяющееся появлением колебаний температуры и постепенной синхронизацией с колебаниями температуры на свободной конечности. Восстановление синхронности ко-

лебаний по-видимому, можно считать признаком общего восстановления ритма кровоснабжения, характерного для состояния покоя. Как показали проведенные исследования время восстановления ритмичных колебаний после окклюзии составляет около 1.5 – 3 мин. Изменение колебательного характера температуры на монотонный зарегистрировано при повышении температуры окружающей среды, после тепловой адаптации к новым условиям колебания температуры появлялись снова [8].

Анализ спектров колебаний кровотока в конечностях в различных исследованиях ведется на основе сигналов различной физической природы, дающих информацию о колебаниях показателя микроциркуляции, давления, температуры. Несмотря на обнаруживаемую корреляцию этих сигналов [5, 8, 10], построенные на их основе спектры колебаний имеют отличия в распределении мощности сигнала по частотам. Так, контактные измерения колебаний температуры дают спектры, в которых большая часть энергии сосредоточена в диапазоне 0.01 – 0,04 Гц [10], и перед построением этих спектров отфильтровывают частоты менее 0.01 Гц или в качестве начальной частоты анализа используют нижнюю границу эндотелиальных колебаний 0.0095 Гц [4, 8].

В отличие от контактных измерений, тепловизионные измерения дают спектры с преобладающими компонентами на частотах < 0.01 Гц [6, 7, 11], что подтверждается и нашими экспериментами. Для полного анализа колебаний температуры необходимо исследовать колебания в ультранизкочастотном диапазоне.

Степень корреляции колебаний давления в периферических сосудах и температуры на поверхности кожи до конца не выяснена, находят как полную фазовую согласованность колебаний давления и температуры [10], так и наличие 20-ти секундной задержки изменения температуры относительно изменения давления [5].

Колебания температуры конечностей могут быть вызваны не только модуляцией тонуса периферических сосудов, но и нервной активностью кожи [4], регулирующей кожный кровоток. Наличие по крайней мере двух указанных процессов, необходимо учитывать, устанавливая связь колебаний температуры с колебаниями давления или других параметров кровотока.

Заключение

В результате данного исследования зарегистрирована температурная реакция области дистальных фаланг пальцев на окклюзию плечевой артерии для контрольной группы и группы с нарушениями сосудистой регуляции. Проведена интерпретация зависимостей температуры от времени теста с использованием количественных параметров. По сравнению с контрольной группой в случае сосудистых нарушений наблюдается снижение исходной температуры, снижение разностей исходной и минимальной, максимальной и минимальной, исходной и максимальной температур, снижение скорости увеличения температуры после снятия окклюзии.

Установлено, что наиболее выделяющаяся компонента спектра колебаний температуры имеет частоту около 0.004 Гц. Колебания температуры происходят синхронно на двух руках, колебательный характер температуры соответствует завершению адаптации к внешним воздействующим условиям.

Выявленные особенности температурной реакции на окклюзионную пробу и характер колебаний температуры могут служить диагностическим критерием для оценки функционального состояния кровеносных сосудов.

Литература

1. Крупаткин, А.И. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. А.И.Крупаткин, В.В. Сидоров. – М.: Медицина. 2005. 256 с.
2. Тихонова И.В., Танканаг А.В., Косякова Н.И. и др. Возрастные особенности функционирования микроциркуляторного русла кожи человека // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2005. №10. С. 1132–1137.
3. Strucl M., Pretec D., Finderle Z., Maver J. Pressure sensitivity of flow oscillation in postocclusive reactive skin hyperemia. // Am. J. Physiol. 1994, Vol. 266, P. 1762 – 1768.
4. Involvement of sympathetic nerve activity in skin flow oscillations in humans. Söderström T., Stefanovska A., Veber M. et al. // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiology, 2003. Vol. 284, p. 1638-1646.
5. Burton A.C., Taylor R.M. A study of the adjustment of peripheral vascular tone to the requirement of the regulation of body temperature. // Am. J. Physiol. 1940. Vol 129. p. 566-577.
6. Godik E.E., Guljaev Yu. V., Markov A.G. et al. Infrared dynamical thermovision of the biological objects. // Int. J. of infrared and millimeters waves. - 1987. - Vol. 8. - №5. - P. 517- 533.
7. Kondo K., Kakuta N., Chinzei T. et al. Thermal rhytmography – topograms of the spectral analysis of fluctuations in skin temperature. // IEEE. Eng. In Med. & Biol. Soc. 2001. Vol 3. p. 2812-2815.
8. Podtaev S., Morozov M., Frick P. Wavelet – based correlation of skin temperature and blood flow oscillations // Cardiovasc. Eng. 2008. Vol. 8, p. 185-189.
9. Цвибель В.Д., Пеллерито Д.С. Ультразвуковое исследование сосудов: перс англ. Под ред. В.В. Митькова, Ю.М. Никитина, Л.В. Осипова.- М.: Издательсктй дом Видар - М, 2008. – 646 с.
10. Shusterman V., Anderson K.P., Barnea O. Spontaneous temperature oscillations in normal human subjects// Am. J. Regul Integr. Comp. Physiol. 1997. Vol 273, p. 1173 – 1181.
11. Mabuchi K., Chinzei T., Nasu Y., Yonezawa T., Fujimasa I., Atsumi K. /Frequency analysis of skin temperature and its application for clinical diagnosis // Biomed Thermol. 1989. Vol. 9. p. 30–33.