



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 460–473

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 460–473

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-460-473>, EDN: WUGGKY

Научная статья

УДК 621.384.3:61



Термовизуализация микрогемодинамики и интегрированное картирование активности потовых желез как метод диагностики автономной нейропатии

А. А. Сагайдачный¹✉, А. В. Антонов¹, И. С. Залетов¹, Д. И. Майсков¹, А. В. Фомин¹, С. Н. Потахин², Ан. В. Скрипаль¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

Сагайдачный Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, andsag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5296-1968>, AuthorID: 612410

Антонов Андрей Валерьевич, инженер кафедры медицинской физики, antonovav29012003@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7710-1577>

Залетов Иван Сергеевич, ассистент кафедры медицинской физики, izaletov25@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1419-7372>, AuthorID: 1035350

Майсков Дмитрий Игоревич, ассистент кафедры медицинской физики, dmayskov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3487-2590>, AuthorID: 1035884

Фомин Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, 89050344175@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1568-8317>, AuthorID: 683997

Потахин Сергей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой госпитальной хирургии лечебного факультета, potakhin_sn@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4159-3047>

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой медицинской физики, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, AuthorID: 33340

Аннотация. Динамическая инфракрасная термография является перспективным методом для визуализации физиологических процессов, не только микрогемодинамики, но и активности эккриновых потовых желез. Нарушение активности потовых желез в исследуемых зонах может свидетельствовать, прежде всего, о повреждении холинергических нервных волокон. **Цель:** разработка нового подхода к анализу динамических термограмм, основанного на разделении исходного температурного сигнала на две независимых компоненты: вазомоторный (микрогемодинамика) и судомоторный (активность потовых желез), и применение данного подхода для выявления нейропатии в группе пациентов с сахарным диабетом 2-го типа. **Материалы и методы:** Запись динамических термограмм проводилась с помощью охлаждаемой камеры с температурной чувствительностью 0.02°C в процессе выполнения дыхательной пробы, заключающейся в трех резких вдохах с интервалом 2 мин. Термограммы регистрировались у 11 здоровых испытуемых и 11 пациентов с сахарным диабетом 2-го типа, средний возраст участников групп 58 ± 7 лет. Точки термограммы разделялись на два класса: в первом классе динамика температуры обусловлена влиянием только микрогемодинамики, во втором – совокупным влиянием микрогемодинамики и активности потовых желез. Для классификации точек термограммы использовались значения модуля производной температурных колебаний с порогом более 0.03°C/с. Визуализация областей активных потовых желез проводилась посредством интегрирования информации, полученной за всё время эксперимента. **Результаты:** Использование полученных интегрированных карт позволило определить относительную площадь, занимаемую активными потовыми железами в группе пациентов с сахарным диабетом 2-го типа 5.25% и в группе здоровых испытуемых – 22.25%. Результаты свидетельствуют о статистически значимом уменьшении площади активных потовых желез в группе пациентов с сахарным диабетом по сравнению с группой нормы, что может являться признаком нарушения холинергической симпатической иннервации и наличия диабетической нейропатии верхних конечностей. Таким образом, интегрированная карта функционирующих потовых желез дает возможность клиническому специалисту определять площадь поверхности тела с нарушенной автономной функцией в области конечностей, в частности, оценивать степень выраженности периферической нейропатии у пациентов с сахарным диабетом 2-го типа.

Ключевые слова: термография, сахарный диабет, гемодинамика, потовые железы, нейропатия, автономная функция, визуализация, производная, температура

Для цитирования: Сагайдачный А. А., Антонов А. В., Залетов И. С., Майсков Д. И., Фомин А. В., Потахин С. Н., Скрипаль Ан. В. Термовизуализация микрогемодинамики и интегрированное картирование активности потовых желез как метод диагностики автономной нейропатии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 460–473. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-460-473>, EDN: WUGGKY

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



Article

Thermal imaging of microhemodynamics and integrated mapping of sweat gland activity as a method for diagnosing autonomic neuropathy

A. A. Sagaidachnyi¹✉, A. V. Antonov¹, I. S. Zaletov¹, D. I. Mayskov¹, A. V. Fomin¹, S. N. Potakhin², An. V. Skripal¹

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²V. I. Razumovsky Saratov State Medical University, 112 Bolshaya Kazachya St., 410012 Saratov, Russia

Andrey A. Sagaidachnyi, andsag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5296-1968>, AuthorID: 612410

Andrey V. Antonov, antonovav29012003@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7710-1577>

Ivan S. Zaletov, izaletov25@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1419-7372>, AuthorID: 1035350

Dmitriy I. Mayskov, dmayskov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3487-2590>, AuthorID: 1035884

Andrey V. Fomin, 89050344175@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1568-8317>, AuthorID: 683997

Sergey N. Potakhin, potakhin_sn@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4159-3047>

Anatoliy V. Skripal, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, AuthorID: 33340

Abstract. **Background and Objectives:** Dynamic infrared thermography is a promising method for imaging physiological processes, including not only microhemodynamics but also the activity of eccrine sweat glands. Impaired sweat gland activity in the examined areas may primarily indicate damage to cholinergic nerve fibers. This study aims to develop and apply a novel approach for analysing dynamic thermograms, which is based on the separation of the original temperature signal into two independent components—vasomotor (microhemodynamics) and sudomotor (sweat gland activity)—for the detection of neuropathy in patients with type 2 diabetes mellitus. **Materials and Methods:** Dynamic thermograms were recorded using a cooled camera with a temperature sensitivity of 0.02°C during a breathing test, which involved three sharp inhalations performed at 2-minute intervals. Thermograms were obtained from 11 healthy subjects and 11 patients with type 2 diabetes mellitus; the mean age of the participants was 58 ± 7 years. Thermogram pixels were classified into two categories: in the first category, temperature dynamics were influenced solely by microhemodynamics, while in the second category, they were influenced by the combined effect of microhemodynamics and sweat gland activity. To classify thermogram points, the values of the modulus of the derivative of temperature fluctuations with a threshold above 0.03°C/s were used. Visualization of regions with active sweat glands was achieved by integrating the information obtained over the entire duration of the experiment. **Results:** The use of the obtained integrated maps has made it possible to determine the relative area occupied by active sweat glands in the group of patients with type 2 diabetes mellitus (5.25%) and in the group of healthy subjects (22.25%). The results indicate a statistically significant decrease in the area of active sweat glands in the group of patients with diabetes mellitus compared to the control group. This finding may be a sign of impaired cholinergic sympathetic innervation and the presence of diabetic neuropathy in the upper limbs. **Conclusions:** The integrated map of functioning sweat glands enables a clinician to identify the body surface area with impaired autonomic function in the limbs, particularly for assessing the severity of peripheral neuropathy in patients with type 2 diabetes mellitus.

Keywords: thermography, diabetes mellitus, hemodynamic, sweat glands, neuropathy, autonomic function, imaging, derivative, temperature

For citation: Sagaidachnyi A. A., Antonov A. V., Zaletov I. S., Mayskov D. I., Fomin A. V., Potakhin S. N., Skripal An. V. Thermal imaging of microhemodynamics and integrated mapping of sweat gland activity as a method for diagnosing autonomic neuropathy. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 460–473 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-460-473>, EDN: WUGGKY

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Динамическую инфракрасную термографию можно рассматривать в качестве перспективного инструмента для визуализации анатомических структур и физиологических процессов на поверхности живых объектов наряду с методами лазерной допплеровской, спектр-контрастной и фотоплетизмографической визуализации [1, 2].

Повышение пространственного разрешения динамических термограмм в сочетании с высокой скоростью записи создало предпосылки для разработки методов, позволяющих визуализировать и изучать активность единичных эккриновых потовых желез [3–5]. Практическая важность изучения эккриновых потовых желез состоит в том, что они активируются посредством малых симпатических нервных волокон

холинергического типа. Повреждение нервных волокон, например при развитии периферической нейропатии у пациентов с сахарным диабетом, может приводить к нарушению секреторной функции потовых желез в соответствующих анатомических зонах. Достоверно установлено снижение плотности нервных волокон при сахарном диабете, приводящее к различным аномалиям потоотделения [6–8]. Высокий уровень сахара в крови при сахарном диабете приводит постепенно к повреждению нервных волокон в результате прямого токсического действия гипергликемии на нервные волокна, нарушению микроциркуляции в сосудах, питающих нервы (*vasa nervorum*), ишемии и повреждению аксонов, накоплению сorbitola и окислительному стрессу внутри нервного волокна [9, 10]. Секреторная функция самих потовых желез может



нарушаться вторично лишь на поздних стадиях диабета, например, вследствие длительного течения микроангиопатии кожи [11].

Как было показано в работе [12], пульсирующее потоотделение может характеризовать судомоторную активность, которая часто сопровождается активацией стенки кровеносных сосудов [13]. Поэтому при выполнении температурных измерений требуется развитие подходов к раздельному анализу симпатической активации потовых желез и кровеносных сосудов.

В настоящее время известно применение инфракрасной термографии для диагностики нейропатии нижних конечностей и синдрома диабетической стопы лишь непосредственно по температурным параметрам кожи без анализа активности потовых желез [14]. Отсутствие раздельной оценки вазомоторного и судомоторного компонентов температурного сигнала существенно снижает диагностическую ценность метода, так как не позволяет дифференцировать нарушение нервной регуляции потовых желез от изменений микроциркуляции. Актуальным для биомедицинской диагностики является развитие новых модельных физических и математических подходов к тепловизионному анализу одновременно активности потовых желез и гемодинамики в микрососудах как в области неврологии, эндокринологии, так и ряде других клинических направлений.

Однородность пространственного распределения активных потовых желез и интенсивность потоотделения определяются анатомическими, функциональными и рядом физиологических особенностей организма человека [15]. При проведении физических измерений, таких как динамический тепловизионный анализ, интерпретация результатов обычным медицинским работником затруднена вследствие большого объема получаемых пространственно-временных данных. Наиболее информативным для биомедицины представляется результат в виде карты, отражающей пространственное распределение свойств объекта исследования за всё время проведения эксперимента.

Целью настоящей работы является разработка и валидация нового подхода к анализу динамических термограмм, основанного на алгоритмическом разделении исходного температурного сигнала на две независимые компоненты – вазомоторный (микрогемодинамика) и судомоторный (активность потовых желез). Исследуются перспективы применения подхода для

комплексной оценки состояния периферической микроциркуляции и автономной иннервации. На примере анализа активности потовых желез демонстрируются возможности количественной диагностики автономной нейропатии как осложнения сахарного диабета 2-го типа.

1. Методы исследования

1.1. Разделение и анализ двух независимых компонент температурного сигнала

Как нами было показано ранее [8, 16, 17], колебания температуры можно рассматривать как двухкомпонентный сигнал, одна из составляющих которого обусловлена колебаниями кровотока в микрососудах (вазомоторный компонент), вторая – колебаниями активности потовых желез (судомоторный компонент). При этом две компоненты определялись либо с использованием независимого сигнала кровотока, либо с помощью отделения высокочастотных компонент колебаний активности потовых желез от низкочастотных компонент колебаний кровотока в микрососудах. В настоящей работе использовано не частотное, а пространственное разделение точек термограммы объекта также на два класса точек (вазомоторный и судомоторный) с целью анализа компонент, специфика которого зависит от диагностической задачи. Это разделение реализовано с использованием значений модуля производной колебаний температуры по времени в каждой точке термограммы (п. 1.2).

Основная проблема анализа состоит в том, что определив точки, соответствующие областям влияния активности потовых желез на температуру кожи, необходимо дополнительно учитывать влияние колебаний кровотока в данных точках (здесь и далее считается, что количество активных потовых желез и количество пор на поверхности кожи соответствуют друг другу, поскольку каждая видимая на термограмме потовая пора связана только с одной активной потовой железой). Таким образом, колебание средней температуры T_{Avg} зоны интереса на поверхности кожи с активными потовыми железами можно представить в виде линейной комбинации компоненты, зависящей от колебаний температуры кровотока в микрососудах – $\tilde{T}_{BF}(t)$, и компоненты, зависящей от колебаний температуры, обусловленных одновременным влиянием как кровотока в микрососудах, так и потоотделе-

ния — \tilde{T}_{SwBF} :

$$T_{Avg}(t) = N_{BF} \cdot \tilde{T}_{BF}(t) + N_{Sw} \cdot \tilde{T}_{SwBF}(t). \quad (1)$$

Здесь коэффициенты N_{BF} и N_{Sw} , задаваемые соотношениями

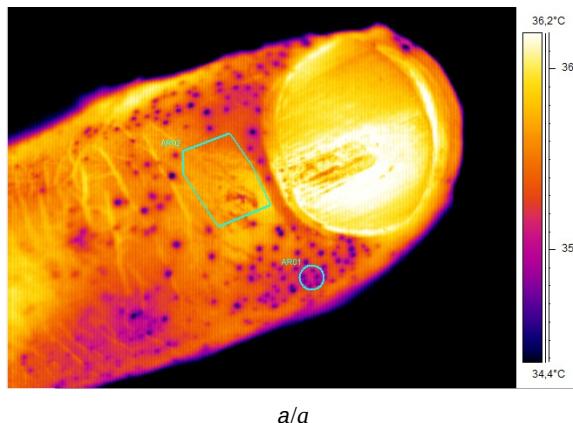
$$\begin{aligned} N_{BF} &= \frac{C_{BF}}{C_{\Sigma}}, & N_{Sw} &= \frac{C_{Sw}}{C_{\Sigma}}, \\ N_{BF} + N_{Sw} &= 1, & C_{\Sigma} &= C_{BF} + C_{Sw}, \end{aligned} \quad (2)$$

имеют следующий смысл: N_{BF} — доля точек кожи без активных потовых желез (АПЖ); N_{Sw} — доля точек кожи с активными потовыми железами (C_{BF} , и C_{Sw} — количество точек без АПЖ и количество точек с наличием таковых соответственно, дающих в сумме общее число C_{Σ}). Обозначая через $\tilde{T}_{Sw}(t)$ компоненту колебаний температуры, обусловленную исключительно влиянием потоотделения, найдем что

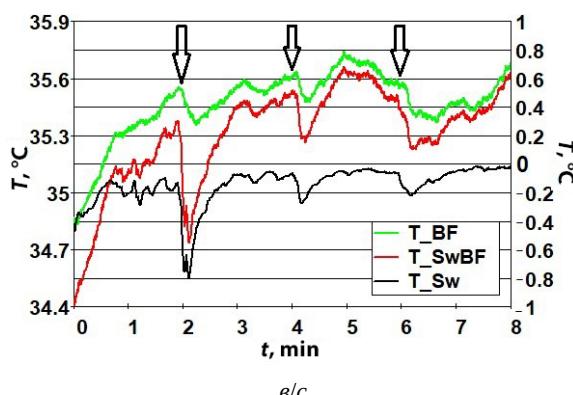
$$\tilde{T}_{SwBF} = \tilde{T}_{Sw}(t) + \tilde{T}_{BF}(t). \quad (3)$$

С учетом (2) в результате подстановки (3) в (1) получим:

$$T_{Avg}(t) = \tilde{T}_{BF}(t) + N_{Sw} \cdot \tilde{T}_{Sw}(t), \quad (4)$$



a/a



b/c

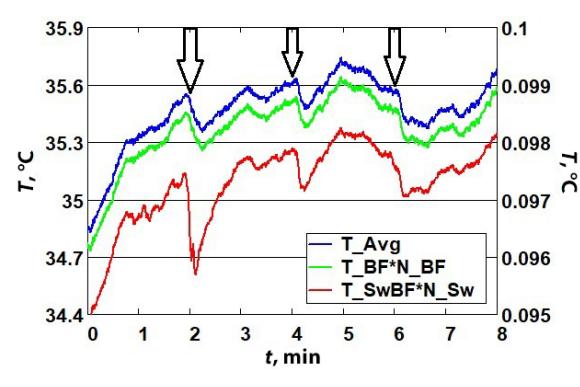
Подставляя выражение для \tilde{T}_{Sw} из формулы (3), найдем из (4) выражение для N_{Sw} :

$$\begin{aligned} N_{Sw} &= \frac{T_{Avg}(t) - \tilde{T}_{BF}(t)}{\tilde{T}_{SwBF}(t) - \tilde{T}_{BF}(t)}, \\ C_{Sw} &= \frac{T_{Avg}(t) - \tilde{T}_{BF}(t)}{\tilde{T}_{SwBF}(t) - \tilde{T}_{BF}(t)} \cdot C_{\Sigma}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) следует, что объемную долю (количество) точек с АПЖ N_{Sw} можно определить, зная среднюю температуру в полной зоне интереса, среднюю температуру в точках вне АПЖ и среднюю температуру в точках АПЖ.

1.2. Пространственное разделение точек термограммы

На рис. 1 приведен пример разложения температурных колебаний на компоненты в соответствии с выражениями (1) (рис. 1, б) и (3) (рис. 1, в) при проведении пробы, состоящей из трех глубоких вдохов. Сигнал \tilde{T}_{BF} представляет собой среднее значение температуры в точках без наличия АПЖ, \tilde{T}_{Sw} — среднее значение температуры в точках с наличием АПЖ. Выделение компонент проведено с использованием описываемого ниже алгоритма.



b/b

Рис. 1. Разделение температурного сигнала на компоненты: кадр термограммы с областями интереса, содержащими активные потовые железы и без них (а); компоненты выражения (1) (б); компоненты выражения (3) (в). Для компонент $N_{Sw} \times \tilde{T}_{SwBF}$, \tilde{T}_{Sw} и \tilde{T}_{BF} справа приведена шкала, стрелки над кривыми указывают моменты глубокого вдоха (цвет онлайн)

Fig. 1. Separation of the temperature signal into components: a — thermogram frame with areas of interest with and without active sweat glands (a); components of expression (1) (b); components of expression (3) (c). For components $N_{Sw} \times \tilde{T}_{SwBF}$, \tilde{T}_{Sw} and \tilde{T}_{BF} the scale is on the right, the arrows above the curves indicate the moments of deep inhalation (color online)

На рис. 1 видно, что форма сигналов компонент отличается. Каждый глубокий вдох сопровождается резким снижением температуры в области АПЖ и более плавным снижением температуры в области без АПЖ. Рис. 1, б демонстрирует, что компонента \tilde{T}_{Sw} вносит значимый вклад в динамику средней температуры зоны интереса, но не связана непосредственно с динамикой кровотока. Поэтому проведение температурного анализа микрогемодинамики без учета влияния компоненты \tilde{T}_{Sw} , обусловленной активностью потовых желез, может приводить к искажению результатов и некорректной их интерпретации. Для определения компоненты \tilde{T}_{Sw} , обусловленной исключительно АПЖ, необходимо определить точки термограммы без наличия АПЖ и точки с наличием таковых, то есть пространственно разделить два класса точек.

Пространственное разделение термограммы на класс точек, обусловленных преимущественным влиянием микрогемодинамики, и класс точек, обусловленных совокупным влиянием как микрогемодинамики, так и активности потовых

желез реализовано с использованием модуля производной колебаний температуры по времени, вычисленной в каждой точке термограммы.

На рис. 2 приведены средние значения колебаний температуры T_{BF} в области без АПЖ и температуры в области с наличием АПЖ (компоненте T_{SwBF}), а также модули временных производных этих компонент (см. соответствующие области интереса на рис. 1, а).

Графики на рис. 2 демонстрируют, что значения модуля производных в областях без АПЖ значительно ниже модуля производной в областях с наличием АПЖ. Это позволяет ввести пороговое значение производной для выделения точек термограммы, подверженных влиянию АПЖ. Проведенные вычисления на группе здоровых испытуемых показали, что для этого можно использовать пороговое значение в диапазоне 0.03–0.09°C/s (диаграмма показана на рис. 3). Для данных, представленных на рис. 2, максимальные значения модуля производной в точках термограммы без АПЖ не превышают медианы параметра в точках с наличием АПЖ, поэтому

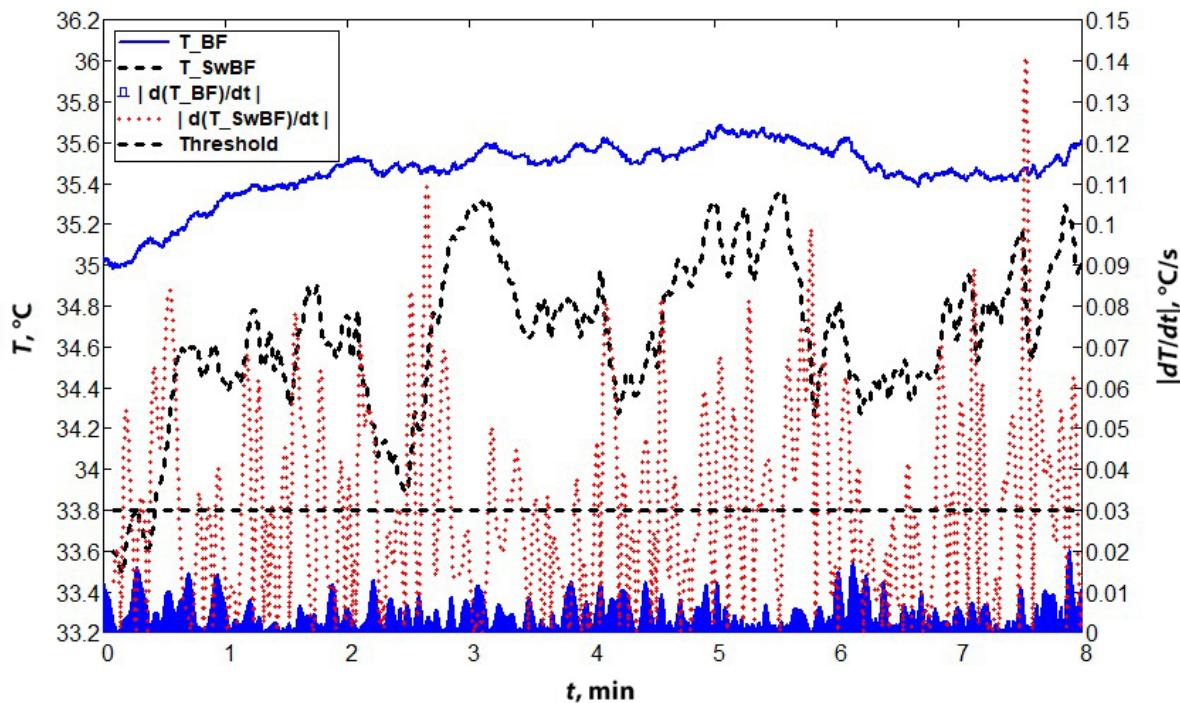


Рис. 2. Колебания температуры (штка слева) в области без АПЖ (сплошная линия) и в области АПЖ (штриховая линия). Колебания модуля производной температуры (штка справа) в области без АПЖ (сплошная заливка) и в области с наличием АПЖ (точечная линия). Штриховая прямая линия отмечает порог значения производной на уровне 0.03°C/s (цвет онлайн)

Fig. 2. Temperature fluctuations (left scale) in the region without APJ (solid line) and in the region with APJ (dashed line). Fluctuations in the absolute value of the temperature derivative (right scale) in the region without APJ (solid fill) and in the region with APJ (dotted line). The dashed straight line marks the threshold of the derivative value at 0.03°C/s (color online)

задание порога $0.03^{\circ}\text{C}/\text{s}$ достаточно для разделения двух классов точек. При этом к точкам пор будут относится области, в которых модуль производной выше порога.

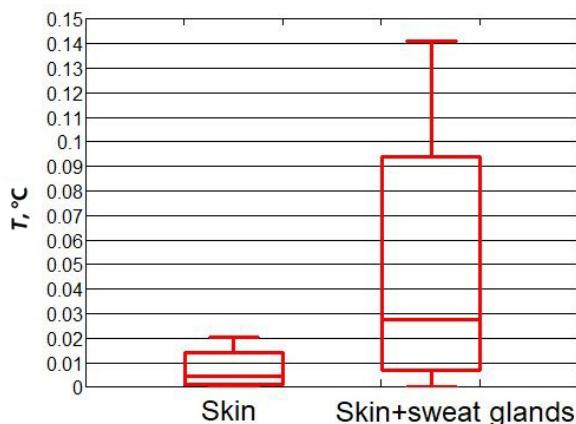


Рис. 3. Статистическое распределение значений модуля временных производных колебаний температуры в области кожи без АПЖ (слева) и с наличием АПЖ (справа)
Fig. 3. Statistical distribution of the values of the module of the derivatives of temperature fluctuations in the skin area without active sweat glands (left) and with active sweat glands (right)

На рис. 4 приведен пример пространственного разделения точек термограммы на два класса с порогом модуля производной $0.03^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Видно, что пороговая обработка исходной динамической термограммы (рис. 4, а) позволила отделить области с активными потовыми железами (светлые пятна на рис. 4, б) от областей без активных потовых желез (темные области на рис. 4, б)

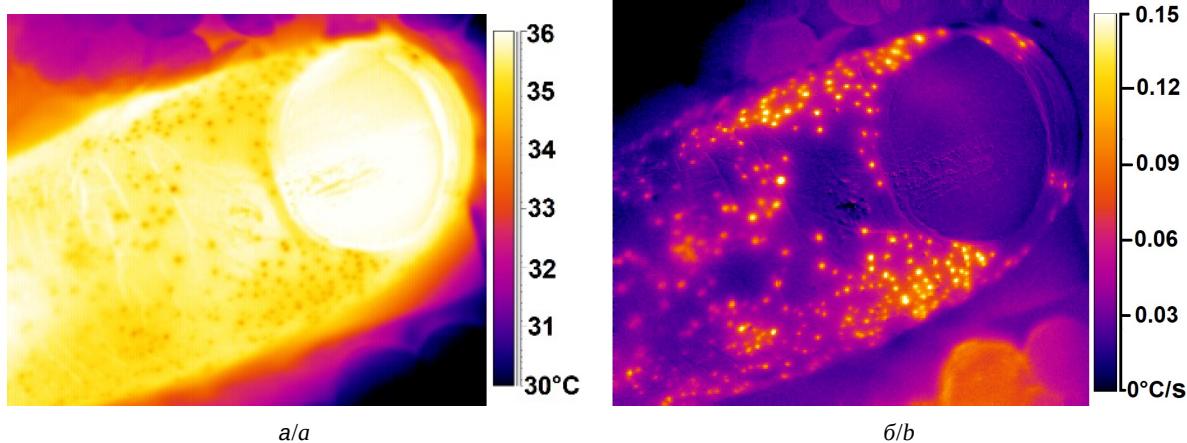


Рис. 4. Пример определения точек термограммы, отражающих проявление активности эккриновых потовых желез на основе использования модуля производных температуры по времени: исходная термограмма до обработки (шкала в градусах) (а); термограмма после обработки (шкала в значениях производных температуры по времени) (б) (цвет онлайн)

Fig. 4. Example of determining thermogram points reflecting the manifestation of the activity of eccrine sweat glands based on the use of the temperature derivative module over time: the initial thermogram before processing (scale in degrees) (a); the thermogram after processing (scale in values of temperature derivatives over time) (b) (color online)

Таким образом, вычисление модуля производной в каждой точке динамической термограммы и установление порога в диапазоне $0.03\text{--}0.09^{\circ}\text{C}/\text{s}$, дает возможность определить два различных класса точек с наличием и отсутствием активных потовых желез.

1.3. Нагрузочная проба с глубоким вдохом и термографическая регистрация

Для стимуляции одновременной работы потовых желез применялась дыхательная проба (ДП) – тест, основанный на выполнении резко-го глубокого вдоха. У большинства людей такая проба вызывает синхронное сужение артериол кожи, опосредованное симпатической нервной системой [18]. В ходе исследования серия из трёх таких глубоких вдохов производилась на 2, 4 и 6 мин эксперимента с двухминутными интервалами. В промежутках между вдохами участники дышали ровно и произвольно. На протяжении всех 8 минут процедуры выполнялась непрерывная термографическая запись фаланг пальцев.

В исследовании приняли участие две группы испытуемых: контрольная группа из 11 здоровых добровольцев (5 женщин и 6 мужчин в возрасте 50–65 лет без сердечно-сосудистых, респираторных и неврологических заболеваний) и группа пациентов того же возраста и численности (6 женщин и 5 мужчин) с диагнозом сахарный диабет 2-го типа, осложнённый диабетической периферической нейропатией нижних конечностей. Для расчета статистической значимости



различий между группами использовался непараметрический критерий Манна – Уитни, так как при небольшом объеме выборки сложно оценить, являются ли полученные данные распределенными по нормальному закону.

Критерии включения для пациентов с сахарным диабетом 2-го типа: продолжительность заболевания 3–5 лет, компенсированное или субкомпенсированное состояние углеводного обмена с уровнем гликированного гемоглобина (HbA1c) от 6.5 до 8.5%, стабильная схема лечения на протяжении последних 3 месяцев, выявленная полинейропатия нижних конечностей на основе соответствующих симптомов и признаков, а также инструментально подтвержденная с использованием метода электронейромиографии. Критерии включения для здоровых испытуемых: отсутствие диагноза «сахарный диабет» любого типа, отсутствие сердечно-сосудистых, неврологических и эндокринных хронических заболеваний.

Критерии исключения для пациентов с сахарным диабетом 2-го типа: заболевания щитовидной железы, неврологические расстройства, не связанные с сахарным диабетом, хроническая сердечная недостаточность. Критерии исключения для группы здоровых испытуемых: наличие нарушений толерантности к глюкозе, наличие заболеваний, влияющих на потоотделение, наличие кожных заболеваний в областях измерения.

Исследование было одобрено Этическим комитетом Саратовского государственного медицинского университета им. В. И. Разумовского и проводилось в условиях клинической лаборатории под медицинским контролем. Все участники предоставили информированное добровольное согласие на исследование до начала измерений.

Регистрация сигнала температуры кожи проводилась с использованием длинноволновой тепловизионной камеры ThermaCam SC 3000 (FLIR Systems, Швеция) с макролинзой 34/100, работающей в спектральном диапазоне 8–9 мкм. Температурная чувствительность системы составляла 0.02°C , разрешение – 320×240 пикселей. Анализируемый участок поверхности пальцев (площадью около 4 см²) оставался неизменным. Кисть и пальцы фиксировались на пенопластовой подложке с помощью двустороннего скотча. Это позволяло обеспечить неподвижность руки во время записи термограмм и минимизировать влияние теплопроводности поверхности стола на процессы терморегуляции. Измерения проводились в помещении при температуре $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$,

влажности воздуха $50 \pm 5\%$, при отсутствии форсированной конвекции и прямых источников инфракрасного излучения с температурой выше комнатной.

1.4. Интегрированное картирование активности потовых желез

Идея интегрированного функционального картирования состоит в накоплении признаков активности потовых желез в каждой точке анализируемой поверхности кожи за полное время проведения экспериментальной записи и построение результирующей карты активности потовых желез. Для построения интегрированной карты активности потовых желез строятся два изображения: карта интенсивности потоотделения (КИП) и карта времени активности потовых желез (КВП). Отношение КИП/КВП дает интегрированную карту активности потовых желез (ИКАП).

В качестве признака, характеризующего интенсивность потоотделения, выбрана сумма модулей производной колебаний температуры в точках с активными потовыми железами на основе которого строилась карта интенсивности (КИП) работы потовых желез. При этом выбирались значения модуля производной только в те моменты времени, в которые производная превышала заданный порог.

Время активности потовых желез определялось как среднее значение времени, в течение которого модуль производной колебаний температуры в точках активных потовых желез превышал порог. На основе этих значений строилась КВП. Затем с использованием двух полученных карт строилась интегрированная карта ИКАП=КИП/КВП.

Алгоритм обработки термограмм и процесс построения интегрированной карты можно проиллюстрировать схемой на рис. 5.

На шаге I проводится термографическая регистрация воллярной поверхности дистальных фаланг пальцев в состоянии покоя и при проведении дыхательной пробы (см. п. 1.3). С помощью вычисления модуля временной производной колебаний температуры в каждой точке термограммы и порога выделяются два класса точек объекта (см. п. 1.2). Динамика температуры в первом классе точек обусловлена преимущественно колебанием кровотока в микрососудах кожи, во втором – совокупностью колебаний кровотока и активностью потовых желез (шаг II) (см. п. 1.1). На шаге III строятся два типа ин-

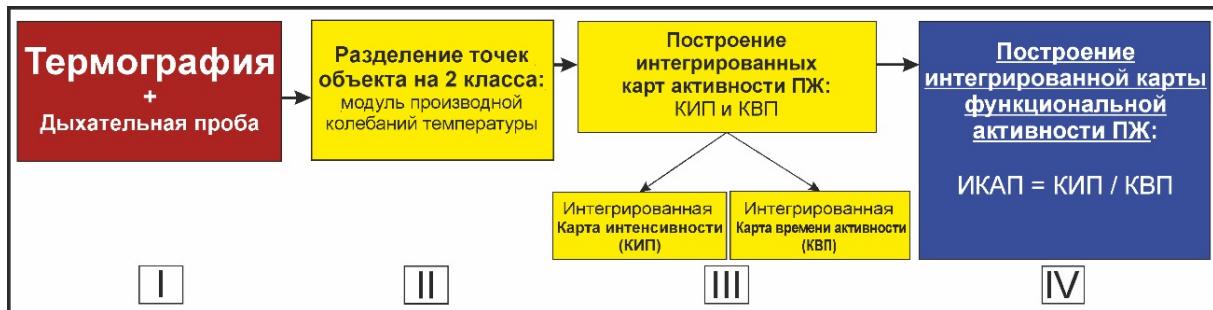


Рис. 5. Схема построения интегрированной карты активности потовых желобков

Fig. 5. Scheme of plotting of an integrated map of sweat gland activity

тегрированных карт, характеризующих среднюю интенсивность потоотделения и среднее время активности. На завершающем шаге IV строится интегрированная карта активности потовых желез (ИКАП).

2. Результаты исследования

На рис. 6 приведен пример интегрированных карт, построенных для здорового испытуемого. Видно, что активные потовые железы пространственно распределены в виде нескольких агломератов и занимают значительную площадь поверхности пальца. Вид карты интенсивности

потоотделения (рис. 6, а) незначительно отличается от вида карты времени активности потовых желез (рис. 6, б), поэтому на интегральной карте активность потовых желез однородно распределена по пространству (рис. 6, в).

На рис. 7 приведены примеры типичных термограмм и интегрированных функциональных карт активности потовых желез за всё время эксперимента для здоровых испытуемых (а, б) и пациентов (в, г).

Интегрированные функциональные карты показывают уменьшение площади активных потовых желез в группе пациентов с сахарным

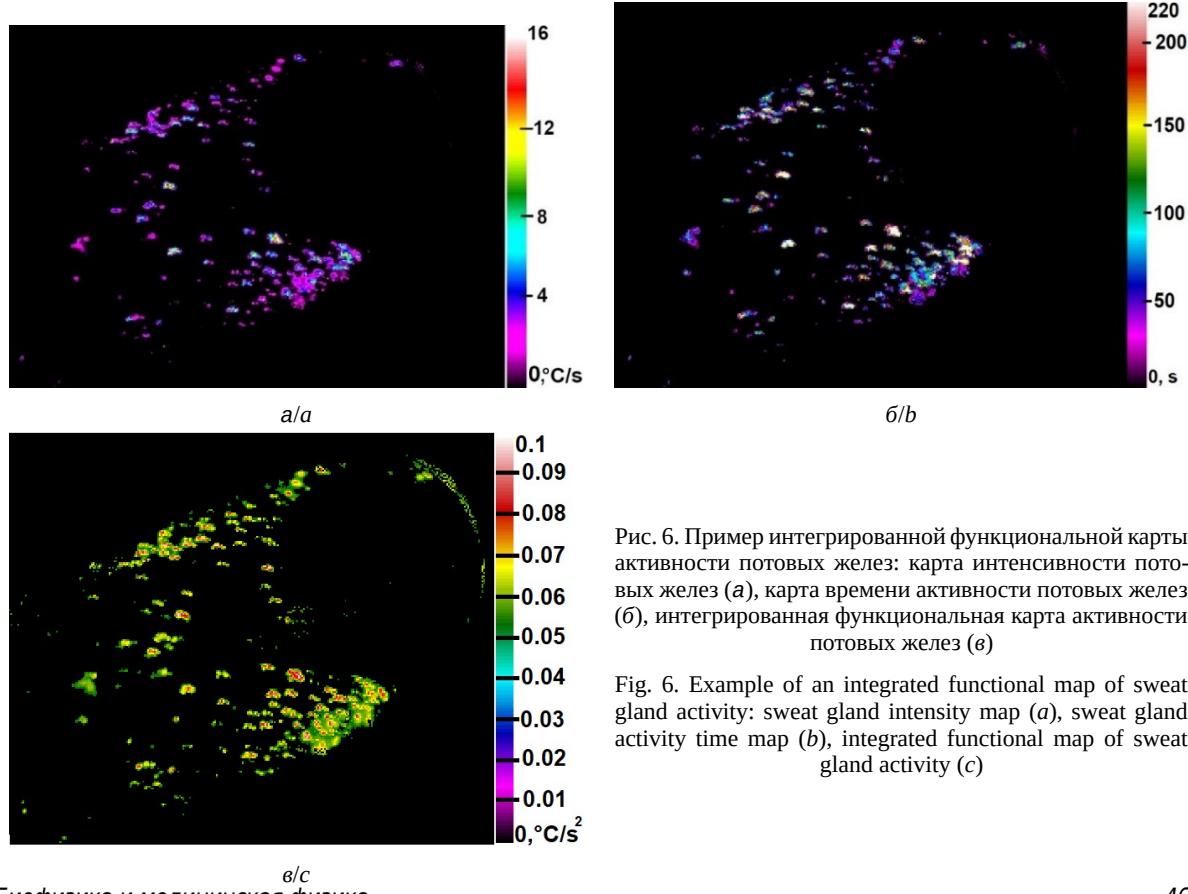


Рис. 6. Пример интегрированной функциональной карты активности потовых желобков: карта интенсивности потовых желобков (а), карта времени активности потовых желобков (б), интегрированная функциональная карта активности потовых желобков (в)

Fig. 6. Example of an integrated functional map of sweat gland activity: sweat gland intensity map (a), sweat gland activity time map (b), integrated functional map of sweat gland activity (c)

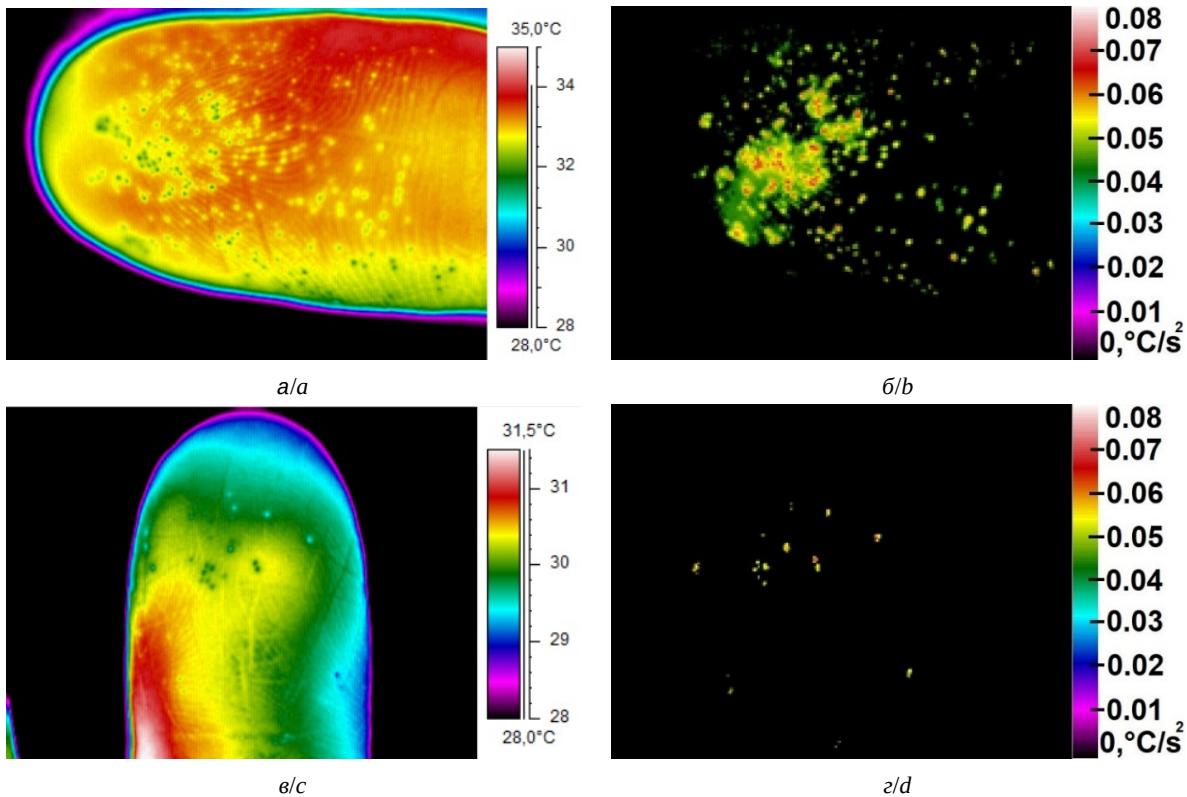


Рис. 7 Пример интегрированных функциональных карт активности потовых желез и соответствующих термограмм (слева – термограммы (а, в), справа – интегрированные функциональные карты) б, г): здоровый испытуемый (а, б); пациент с сахарным диабетом, осложненным периферической нейропатией нижних конечностей (в, г)

Fig. 7. Example of integrated functional maps of sweat gland activity: healthy subject (a, b); patient with diabetes mellitus complicated by peripheral neuropathy of the lower extremities (c, d) (left – thermograms, right – integrated functional maps): healthy subject (a, b); patient with diabetes mellitus complicated by peripheral neuropathy of lower extremities (c, d)

диабетом, осложненным диабетической периферической нейропатией нижних конечностей. В этой группе активные потовые железы расположены изолированными островками. Карта здорового человека характеризуется более равномерным пространственным распределением активных потовых желез (рис. 7, б) и большей их площадью по сравнению с диабетической группой (рис. 7, г).

В таблице представлены средние значения площади, занимаемой активными потовыми железами для группы здоровых испытуемых

и группы пациентов. Данные указаны в формате среднее значение \pm среднеквадратичное отклонение.

3. Обсуждение результатов

3.1. Раздельный анализ микрогемодинамики и активности потовых желез с помощью термовизуализации

Как было показано в п. 1.1, колебания температуры, регистрируемые тепловизором на поверхности тела человека, не описывают прямую динамику потоотделения. Температурный

Сравнение средних значений относительной площади кожи с активными потовыми железами в группе здоровых испытуемых и группе пациентов при площади зоны интереса 4 cm^2

Comparison of the average values of the relative area of skin with active sweat glands in the group of healthy subjects and the group of patients with the area of the zone of interest 4 cm^2

Параметр / Parameter	Здоровые испытуемые / Healthy subjects	Пациенты / Patients
Площадь потовых желез, cm^2 / Sweat gland area, cm^2	0.89 ± 0.43	0.21 ± 0.11
Относительная площадь потовых желез, % / Relative area of sweat glands, %	22.25 ± 10.75	5.25 ± 2.75

сигнал в областях с активными потовыми железами представляет собой совокупность двух компонент: первая из которых обусловлена преимущественным влиянием колебаний кровотока в микрососудах кожи ($\tilde{T}_{BF}(t)$), вторая компонента \tilde{T}_{SwBF} – суммой вкладов как колебаний кровотока, так и процессов потоотделения (см. выражения (1)–(3)). Как следует из (4), средняя температура зоны T_{Avg} , включающей точки кожи с активными потовыми железами и точки без них, зависит от суммы компоненты $\tilde{T}_{BF}(t)$ и взвешенной компоненты $\tilde{T}_{Sw}(t)$, представляющей собой колебания температуры, обусловленные исключительно влиянием активности потовых желез. Поэтому изучение активности потовых желез методом термографии без учета температурных колебаний, обусловленных колебанием кровотока, будет не вполне корректным. Некорректным будет и термографический анализ колебаний кровотока в тех областях, где присутствуют активные потовые железы. Как показано на рис. 1, в, учет компоненты $\tilde{T}_{BF}(t)$ позволяет выровнять сигнал $\tilde{T}_{Sw}(t)$, демонстрирующий значительные изменения только в момент глубокого вдоха при проведении дыхательной пробы и синхронной активации комплекса потовых желез.

Использование модуля производной колебаний температуры и задание порога производной позволило провести разделение точек термограммы на класс, содержащий точки кожи без активных потовых желез и класс с их наличием (см. п. 1.2). Такой подход демонстрирует эффективность, поскольку выделение и испарение пота является более быстрым процессом, чем температурные колебания кожи, обусловленные микрогемодинамикой. После определения двух классов точек становится возможным исследование колебаний температуры $\tilde{T}_{BF}(t)$ и $\tilde{T}_{Sw}(t)$, что открывает возможность раздельного анализа работы двух физиологических систем – системы регуляции микрогемодинамики и системы регуляции потоотделения. Вследствие иннервации потовых желез симпатическими холинергическими нервыми волокнами, локальное нарушение потоотделения может рассматриваться в качестве признака автономной нейропатии, например при сахарном диабете (см. раздел 2). Таким образом, разделение влияния микрогемодинамики и влияния активности потовых желез на температуру совместно с использованием выражений (1)–(3) обеспечивает возможность корректного и независимого анализа как микрогемодинамики, так

и автономной функции на одной динамической термограмме.

В настоящей работе основное внимание уделено исследованию информации о функционировании потовых желез, отделенной от данных о микрогемодинамике. При этом следует отметить, что изучение параметров сигнала $\tilde{T}_{BF}(t)$, обусловленного микрогемодинамикой и приведенного на рис. 1, в, представляет самостоятельный интерес. Сигнал $\tilde{T}_{BF}(t)$ в группе пациентов с сахарным диабетом может характеризовать регуляцию микрогемодинамики в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном спектральных диапазонах, что может являться предметом отдельного исследования.

3.2. Интерпретация интегрированной карты активности потовых желез

Чем больше интенсивность потоотделения, т. е. объем отделяемого пота, тем больше выражено испарение и скорость охлаждения локальной точки кожи. Поэтому карта интенсивности потоотделения КИП была определена как сумма модулей производной колебаний температуры. Карта времени активности потовых желез КВП характеризует среднее время, в течение которого происходило интенсивное потоотделение. Тогда отношение КИП/КВП, определяющее интегрированную карту активности потоотделения – ИКАП, характеризует интенсивность потоотделения, усредненную за время активного потоотделения. Таким образом, интегрированная карта позволяет оценить площадь поверхности, занимаемую активными потовыми железами, и одновременно получить представление о пространственном распределении интенсивности потоотделения. По данным таблицы относительная площадь кожи, на которой проявляется активность потовых желез, в группе здоровых испытуемых составила 22.25%, что значительно выше по сравнению с группой пациентов с сахарным диабетом – всего 5.25%. Для оценки статистической значимости различий между группами использовали критерий Манна – Уитни. Различия были статистически значимы на уровне $p < 0.001$. В группе здоровых не только большая площадь активности потовых желез, но и большая интенсивность потоотделения по сравнению с группой пациентов с диабетом (см. рис. 7). Снижение количества функционирующих потовых желез в группе пациентов говорит в первую очередь о повреждении симпатических нервных волокон, иннервирующих потовую железу, т. е.



о проявлении автономной нейропатии. Секреторная функция самой потовой железы будет снижаться лишь в тяжелых случаях длительной нейропатии, как было отмечено во введении.

3.3. Термовизуализация и интегрированное картирование как метод диагностики автономной нейропатии

Применение метода интегрированного картирования в группе пациентов с сахарным диабетом показало значительное снижение плотности и пространственной однородности активных потовых желез по сравнению с результатами для здоровых испытуемых (см. рис. 7 и таблицу). Снижение потоотделения на верхних конечностях в ответ на дыхательную пробу может свидетельствовать о поражении немиелинизированных холинергических симпатических нервных волокон, иннервирующих потовые железы [19, 20]. До проведения измерений для всех пациентов была диагностирована диабетическая периферическая нейропатия нижних конечностей. Полученные результаты позволяют предположить наличие недиагностированной диабетической периферической нейропатии также верхних конечностей. Результаты, приведенные на рис. 7, на качественном уровне иллюстрируют отличие интегрированных изображений для пациентов от изображений для здоровых испытуемых. Проведенные исследования на группе испытуемых носят пилотный характер, характеризующийся небольшим объемом выборки. Для количественного подтверждения полученных результатов необходимо проведение отдельного исследования с большей численностью как группы здоровых добровольцев, так и группы пациентов с сахарным диабетом различного возрастного и полового состава, причем с учетом возможного влияния медикаментозной терапии на группу пациентов.

Преимущество использования термографии для анализа активности работы потовых желез состоит в том, что тепловой образ капель пота превосходит их физический размер и размер выводных протоков потовых желез. Это дает возможность при регистрации потоотделения использовать более низкое пространственное разрешение тепловизионной съемки по сравнению с требуемым разрешением съемки в видимом диапазоне. Последнее в случае использования одинакового разрешения съемки способствует расширению поля зрения тепловизионной реги-

страции перспирации с охватом большей анализируемой площади кожи.

3.4. Интегрированная карта как разновидность функционального изображения

Как показано в разделе 1.4, каждая точка интегрированной карты активности потовых желез представляет собой значение модуля производной температуры, усредненное по времени активности. То есть каждая точка интегрированной карты является параметром временной кривой температуры. В такой формулировке интегрированная карта соответствует определению одного из видов функционального изображения в рамках методологии функционального картирования динамических биомедицинских изображений, развитой в серии работ Тараторина, Годика и Гуляева [21–23]. В работах Мерла описана техника визуализации, в которой на одном термографическом изображении визуализируется характеристическое время τ за которое поверхность кожи восстановит первоначальную температуру после внешнего температурного или иного воздействия [24–26]. Данную технику также можно отнести к разновидности функциональных изображений. В отличие от τ метода визуализации и других функциональных изображений, интегрированное изображение активности потовых желез учитывает тот факт, что динамика температуры кожи является не только следствием гемодинамических процессов, но также и локализованным в пространстве влиянием потоотделения. Последнее явление не учитывается в τ методе визуализации вследствие использования термограмм более низкого пространственного разрешения, что приводит к отсутствию учета влияния активности потовых желез на динамическую термограмму.

Выводы

Предложенный подход к анализу динамических термограмм продемонстрировал повышение информативности диагностического исследования за счет того, что в температурном сигнале выделяются две независимые компоненты, характеризующие регуляцию тонуса микрососудов и работу потовых желез. Как было показано, тепловизионный анализ гемодинамики в микрососудах без учета температурного влияния активности потовых желез будет не вполне корректным. Также верно и обратное. Вычисление модуля производной колебаний температуры

в каждой точке термограммы позволяет реализовать раздельный анализ динамики температуры, обусловленный активностью этих двух физиологических регуляторных подсистем.

Использование дыхательной нагрузочной пробы, стимулирующей активность потовых желез, в сочетании с интегрированием карт позволило определить зоны нормальной и нарушенной функции потоотделения на пальцах рук в группе здоровых испытуемых и группе пациентов. Представленное здесь пилотное исследование возможностей использования термовизуализации в сочетании с интегрированным картированием и проведением дыхательной пробы в группе пациентов с сахарным диабетом 2-го типа показало снижение площади активных потовых желез на верхних конечностях на 17% по сравнению с площадью активных потовых желез в группе здоровых испытуемых. Этот факт, с наибольшей вероятностью, можно интерпретировать как нарушение автономной функции (симпатической холинергической иннервации) в группе пациентов с диабетом 2-го типа. Нейропатия при диабете проявляется в первую очередь на нижних конечностях. Поэтому обнаружение нейропатии с помощью термовизуализации и интегрированного картирования также на верхних конечностях может свидетельствовать о возможности раннего выявления данной патологии на доклинической стадии.

Список литературы

- Cutolo M., Smith V.* Detection of microvascular changes in systemic sclerosis and other rheumatic diseases // *Nature Reviews Rheumatology*. 2021. Vol. 17. P. 665–677. <https://doi.org/10.1038/s41584-021-00685-0>
- Campbell J. S., Mead M. N.* Human Medical Thermography. Boca Raton : CRC Press, 2022. 250 p. <https://doi.org/10.1201/9781003281764>
- Vainer B. G., Morozov V. V.* Infrared thermography-based biophotonics: Integrated diagnostic technique for systemic reaction monitoring // *Physics Procedia*. 2017. Vol. 86. P. 81–85. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.01.025>
- Koroteeva E. Y., Bashkatov A. A.* Thermal signatures of liquid droplets on a skin induced by emotional sweating // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2022. Vol. 19, № 2. P. 115–125. <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1846113>
- Vainer B. G.* FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans // *Physics in Medicine & Biology*. 2005. Vol. 50, № 23. P. R63–R94. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/23/R01>
- Lademann J., Sora J.* Correlation between blood flow and various physiological parameters in yuman skin // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2022. Vol. 8, № 4. Art. 040508. <https://doi.org/10.18287/JBPE22.08.040508>
- Krzywicki A. T., Berntson G. G., O'Kane B. L.* A non-contact technique for measuring eccrine sweat gland activity using passive thermal imaging // *International Journal of Psychophysiology*. 2014. Vol. 94. P. 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.06.011>
- Sagaidachnyi A. A., Mayskov D. I., Fomin A. V., Zaletoev I. S., Skripal A. V.* Separate extraction of human eccrine sweat gland activity and peripheral hemodynamics from high-and low-quality thermal imaging data // *Journal of Thermal Biology*. 2022. Vol. 110. Art. 103351. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103351>
- Баринов А. Н., Новосадова М. В.* Вегетативная невропатия при сахарном диабете: клинические проявления, диагностика и лечение // Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2011. № 2. С. 25–33. <https://doi.org/10.14412/2074-2711-2011-143>
- Купцова Е. Н., Ботвинева Л. А.* Современные представления о патогенезе диабетической нейропатии у пациентов с сахарным диабетом 2 типа. Патогенетическое обоснование применения природных лечебных факторов при сахарном диабете // Курортная медицина. 2020. № 3. С. 57–68. EDN: MECMYK
- Singaram S., Ramakrishnan K., Selvam J., Senthil M., Narayananurthy V.* Sweat gland morphology and physiology in diabetes, neuropathy, and nephropathy: A review // *Archives of Physiology and Biochemistry*. 2024. Vol.130, iss. 4. P. 437–451. <https://doi.org/10.1080/13813455.2022.2114499>
- Soliz P., Agurto C., Edwards A., Jarry Z., Simon J., Calder C., Burge M.* Detection of diabetic peripheral neuropathy using spatial-temporal analysis in infrared videos // 2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR 2016). November 6–9, 2016. Pacific Grove, CA, USA. IEEE, 2016. P. 263–267. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2016.7869038>
- Estañol B., Corona M. V., Elías Y., Téllez-Zenteno J. F., Infante O., García-Ramos G.* Sympathetic co-activation of skin blood vessels and sweat glands // *Clinical Autonomic Research*. 2004. Vol. 14, iss. 2. P. 107–112. <https://doi.org/10.1007/s10286-004-0170-6>
- Wohlfart S., Meiller R., Hammersen J., Park J., Menzel-Severing J., Melichar V. O., Schneider H.* Natural history of X-linked hypohidrotic ectodermal dysplasia: A 5-year follow-up study // *Orphanet Journal of Rare Diseases*. 2020. Vol. 15. Art. 7. <https://doi.org/10.1186/s13023-019-1288-x>
- Mayskov D. I., Fomin A. V., Volkov I. U., Zaletoev I. S., Skripal, A. V., Sagaidachnyi A. A.* Statistical and spectral properties of spatio-temporal skin temperature oscillations derived by sweat gland activity: Thermal imaging exploration // *Proceedings SPIE*. 2022. Vol. 12192. Art. 121920Y. <https://doi.org/10.1117/12.2626927>
- Майков Д. И., Сагайдачный А. А., Залетов И. С., Фомин А. В., Скрипаль А. В.* Интегральное картирование активности потовых желез методом дифференциальной термографии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика, 2021. Т. 21, вып. 3.

- C. 222–232. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-3-222-232>
17. Сагайдачный А. А., Майков Д. И., Залетов И. С., Фомин А. В., Скрипаль А. В. Детектирование активности единичных потовых желез методом макротермографии и ее взаимосвязь с температурой кожи и периферической гемодинамикой // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика 2020. Т. 20, вып. 2. С. 103–115. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-20-2-103-115>
 18. Allen J., Howell K. Microvascular imaging: Techniques and opportunities for clinical physiological measurements // *Physiological Measurement*. 2014. Vol. 35, № 7. P. R91 – R141. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/35/7/R91>
 19. Sato K., Kang W. H., Saga K., Sato K. T. Biology of sweat glands and their disorders. I. Normal sweat gland function // *Journal of the American Academy of Dermatology*. 1989. Vol. 20, iss. 4. P. 537–563. [https://doi.org/10.1016/S0190-9622\(89\)70063-3](https://doi.org/10.1016/S0190-9622(89)70063-3)
 20. Malik R. A. Diabetic neuropathy: A focus on small fibres // *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*. 2020. Vol. 36. Suppl. 1. Art. e3255. <https://doi.org/10.1002/dmrr.3255>
 21. Taratorin A. M., Godik E. E., Guljaev Y. V. Functional mapping of dynamic biomedical images // *Measurement*. 1990. Vol. 8, iss. 3. P. 137–140. [https://doi.org/10.1016/0263-2241\(90\)90055-B](https://doi.org/10.1016/0263-2241(90)90055-B)
 22. Godik E. E., Guljaev Y. V., Markov A. G., Petrov A. V., Taratorin A. M. Infrared dynamical thermovision of the biological objects // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1987. Vol. 8. P. 517–533. <https://doi.org/10.1007/BF01013262>
 23. Godik E. E., Guljaev Y. V. Functional imaging of the human body // *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 1991. Vol. 10, iss. 4. P. 21–29. <https://doi.org/10.1109/51.107165>
 24. Cardone D., Merla A. New frontiers for applications of thermal infrared imaging devices: Computational psychophysiology in the neurosciences // *Sensors*. 2017. Vol. 17, iss. 5. Art. 1042. <https://doi.org/10.3390/s17051042>
 25. Ioannou S. Functional infrared thermal imaging: A contemporary tool in soft tissue screening // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Art. 9303. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66397-9>
 26. Сагайдачный А. А., Скрипаль А. В., Усанов Д. А. Тепловизионная биомедицинская диагностика. Саратов : Издательство «Саратовский источник», 2019. 156 с.

References

1. Cutolo M., Smith V. Detection of microvascular changes in systemic sclerosis and other rheumatic diseases. *Nature Reviews Rheumatology*, 2021, vol. 17, pp. 665–677. <https://doi.org/10.1038/s41584-021-00685-0>
2. Campbell J. S., Mead M. N. *Human Medical Thermography*. Boca Raton, CRC Press, 2022. 250 p. <https://doi.org/10.1201/9781003281764>
3. Vainer B. G., Morozov V. V. Infrared thermography-based biophotonics: Integrated diagnostic technique for systemic reaction monitoring. *Physics Procedia*, 2017, vol. 86, pp. 81–85. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.01.025>
4. Koroteeva E. Y., Bashkatov A. A. Thermal signatures of liquid droplets on a skin induced by emotional sweating. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 115–125. <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1846113>
5. Vainer B. G. FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans. *Physics in Medicine & Biology*, 2005, vol. 50, no. 23, pp. R63– R94. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/23/R01>
6. Lademann J., Sora J. Correlation between blood flow and various physiological parameters in human skin. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, 2022, vol. 8, no. 4, art. 040508. <https://doi.org/10.18287/JBPE22.08.040508>
7. Krzywicki A. T., Berntson G. G., O’Kane B. L. A non-contact technique for measuring eccrine sweat gland activity using passive thermal imaging. *International Journal of Psychophysiology*, 2014, vol. 94, pp. 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.06.011>
8. Sagaidachnyi A. A., Mayskov D. I., Fomin A. V., Zal'etov I. S., Skripal A. V. Separate extraction of human eccrine sweat gland activity and peripheral hemodynamics from high-and low-quality thermal imaging data. *Journal of Thermal Biology*, 2022, vol. 110, art. 103351. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103351>
9. Barinov A. N., Novosadova M. V. Autonomic neuropathy in diabetes mellitus: Clinical manifestations, diagnosis and treatment. *Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics*, 2011, no. 2, pp. 25–33 (in Russian). <https://doi.org/10.14412/2074-2711-2011-143>
10. Kuptsova E. N., Botvina L. A. Current ideas of pathogenesis of diabetic neuropathy with patients suffering from type 2 diabetes mellitus. Pathogenetic justification of application of natural therapeutic factors at diabetes mellitus. *Kurortnaya meditsina* [Spa Medicine], 2020, no. 3, pp. 57–68 (in Russian). EDN: MECMYK
11. Singaram S., Ramakrishnan K., Selvam J., Senthil M., Narayananamurthy V. Sweat gland morphology and physiology in diabetes, neuropathy and nephropathy: A review. *Archives of physiology and biochemistry*, 2024, vol. 130, iss. 4, pp. 437–451. <https://doi.org/10.1080/13813455.2022.2114499>
12. Soliz P., Agurto C., Edwards A., Jarry Z., Simon J., Calder C., Burge M. Detection of diabetic peripheral neuropathy using spatial-temporal analysis in infrared videos. *2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR 2016). November 6–9, 2016. Pacific Grove, CA, USA*. IEEE, 2016. Pp. 263–267. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2016.7869038>
13. Estañol B., Corona M. V., Elías Y., Téllez-Zenteno J. F., Infante O., García-Ramos G. Sympathetic co-activation of skin blood vessels and sweat glands. *Clinical Autonomic Research*, 2004, vol. 14, iss. 2, pp. 107–112. <https://doi.org/10.1007/s10286-004-0170-6>
14. Wohlfart S., Meiller R., Hammersen J., Park J., Menzel-Severing J., Melichar V. O., Schneider H. Natural history of X-linked hypohidrotic ectodermal dysplasia: A 5-year

- follow-up study. *Orphanet Journal of Rare Diseases*, 2020, vol. 15, art. 7. <https://doi.org/10.1186/s13023-019-1288-x>
15. Mayskov D. I., Fomin A. V., Volkov I. U., Zaletov I. S., Skripal A. V., Sagaidachnyi A. A. Statistical and spectral properties of spatio-temporal skin temperature oscillations derived by sweat gland activity: Thermal imaging exploration. *Proceedings SPIE*, 2022, vol. 12192, art. 121920Y. <https://doi.org/10.1117/12.2626927>
 16. Mayskov D. I., Sagaidachnyi A. A., Zaletov I. S., Fomin A. V., Skripal A. V. Integral mapping of the sweat-gland activity using differential thermography technique. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 3, pp. 222–232. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-3-222-232>
 17. Sagaidachnyi A. A., Mayskov D. I., Zaletov I. S., Fomin A. V., Skripal A. V. Detection of the single sweat glands activity via the macro thermography techniques and its relation with skin temperature and peripheral hemodynamics. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 103–115. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-103-115>
 18. Allen J., Howell K. Microvascular imaging: Techniques and opportunities for clinical physiological measurements. *Physiological Measurement*, 2014, vol. 35, no. 7, pp. R91 – R141. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/35/7/R91>
 19. Sato K., Kang W. H., Saga K., Sato K. T. Biology of sweat glands and their disorders. I. Normal sweat gland function. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 1989, vol. 20, iss. 4, pp. 537–563. [https://doi.org/10.1016/S0190-9622\(89\)70063-3](https://doi.org/10.1016/S0190-9622(89)70063-3)
 20. Malik R. A. Diabetic neuropathy: A focus on small fibres. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, 2020, vol. 36, suppl. 1, art. e3255. <https://doi.org/10.1002/dmrr.3255>
 21. Taratorin A. M., Godik E. E., Guljaev Y. V. Functional mapping of dynamic biomedical images. *Measurement*, 1990, vol. 8, iss. 3, pp. 137–140. [https://doi.org/10.1016/0263-2241\(90\)90055-B](https://doi.org/10.1016/0263-2241(90)90055-B)
 22. Godik E. E., Guljaev Y. V., Markov A. G., Petrov A. V., Taratorin A. M. Infrared dynamical thermovision of the biological objects. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1987, vol. 8, pp. 517–533. <https://doi.org/10.1007/BF01013262>
 23. Godik E. E., Gulyaev Y. V. Functional imaging of the human body. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 1991, vol. 10, iss. 4, pp. 21–29. <https://doi.org/10.1109/51.107165>
 24. Cardone D., Merla A. New frontiers for applications of thermal infrared imaging devices: Computational psychophysiology in the neurosciences. *Sensors*, 2017, vol. 17, iss. 5, art. 1042. <https://doi.org/10.3390/s17051042>
 25. Ioannou S. Functional infrared thermal imaging: A contemporary tool in soft tissue screening. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, art. 9303. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66397-9>
 26. Sagaidachnyi A. A., Skripal A. V., Usanov D. A. *Teplovizionnaya biomeditsinskaya diagnostika* [Thermal imaging biomedical diagnostics]. Saratov, Izdatelstvo “Saratovskii Istochnik”, 2019. 156 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 26.08.2025; одобрена после рецензирования 05.10.2025;
принята к публикации 10.10.2025; опубликована 28.11.2025

The article was submitted 26.08.2025; approved after reviewing 05.10.2025;
accepted for publication 10.10.2025; published 28.11.2025