

- [3] Tkachuk, R.A., Yavorsky, B.I. and Yanenko, O.P., 2015. Evaluation of the risk of neurotoxicity with the help of electroretinography. *Bulletin of the National Technical University of Ukraine Kyiv Polytechnic Institute, Ser. Radio engineering. Radio equipment construction*, 0(61),108-115pp. DOI:10.33108/RADAR.2015.-61.108-115pp.
- [4] Robson, A.G., Nilsson, J., Li, S., Jalali, S., Fulton, A.B., Tormene, A.P., Holder, G.E. and Brodie, S.E., 2018. ISCEV guide to visual electrodiagnostic procedures. *Documenta Ophthalmologica*, 136(1), pp.1-26.
- [5] Tymkiv, P., 2021. Analysis of the Complexity of Algorithms for Finding the Coefficients of the Mathematical Model of Low-Intensity Electroretinosignal. In: *Advanced Applied Energy and Information Technologies 2021. Proceedings of the International Conference*, Ternopil, 15-17 December 2021, pp.145-150.
- [6] Muskingum Models Using Nelder-Mead Simplex Algorithm, 2011. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(11), pp.946-954. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000379.
- [7].Ткачук Р.М. та др. Моделювання процесу утворення напружень в оболонці ока при глаукомі в дитячому віці. /23-я МНТК «Приладобудування: стан і перспективи», 14-15.05.2024, Київ,Україна//. - К:НТУУ «КПІ»ім.І.Сікорського. - С.165-168.

УДК 621.397.3.616.379-008.64-072

ТЕМПЕРАТУРНО-БІОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ДІАБЕТИЧНОЇ СТОПИ У ХВОРИХ НА ЦУКРОВИЙ ДІАБЕТ

¹⁾ Дунаєвський В. І., ¹⁾ Борковська Л. В., ²⁾ Котовський В. Й., ^{2,3,4)} Орел В. Б.,
^{2,3,4)} Орел В. Е., ²⁾ Назарчук С. С.

¹⁾ Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

²⁾ Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

³⁾ ДНП «Національний інститут раку» МОЗ України, Київ, Україна

⁴⁾ Інститут магнетизму ім. В. Г. Бар'яхтара НАН України, Київ, Україна

E-mail: kotovsk.kpi@gmail.com

Цукровий діабет (ЦД) посідає одне з провідних місць серед неінфекційних патологій, а його поширення у світі досягло масштабів пандемії [1]. Згідно з прогнозами Міжнародної діабетичної федерації (The International Diabetes Federation – IDF), кількість пацієнтів із ЦД серед дорослого населення (вікова група 20-79 років) зростає з поточних 250 мільйонів до 439 мільйонів до 2030 року і досягне 592 мільйонів до 2035 року.

Синдром діабетичної стопи (СДС) – одне з найпоширеніших, найтяжчих ускладнень ЦД та важлива медико-соціальна проблема, що часто призводить до підвищення рівня інвалідизації пацієнтів працездатного віку, смертності та значним погіршенням якості життя [2, 3]. Нетравматичні ампутації нижніх кінцівок, що пов'язані з синдромом, здійснюють у 40-70 % хворих на ЦД [4].

В Україні, за даними Центру медичної статистики МОЗ, тільки на початок 2011 року зареєстровано 1 813 000 хворих на ЦД, насправді ж їх принаймні втричі більше, якщо враховувати, що не всі пацієнти вчасно звертаються по медичну допомогу. Виходячи з цих даних, масштаби проблеми діабетичної периферичної невропатії та СДС обчислюються сотнями тисяч хворих. Слід додати, що непрацездатність через інвалідизацію та висока смертність серед

хворих на діабетичну периферичну нейропатію та СДС лягають важким тягарем на суспільство та економіку [5, 6].

Сучасні критерії та методи діагностики загрози втрати кінцівки у хворих на ЦД базуються на різноплановій оцінці симптомів та ознак захворювання периферичних артерій, а також на об'єктивності інструментальних методів дослідження [1, 7].

Такими методами діагностики захворювань артерій нижніх кінцівок є методи візуалізації, зокрема ультразвукове дуплексне сканування, МРТ-ангіографія, КТ-ангіографія та пункційна або катетерна ангіографія. Приховану ішемію можливо встановити також шляхом черезшкірного вимірювання парціального тиску кисню в тканинах стопи – $P_{tc}O_2$. Кожний із вищеперерахованих методів має обмеження: вони в тій чи в іншій мірі інвазивні, діагностичні дослідження тривають значний час, їх виконання вимагає висококваліфікованих кадрів.

Найпростішим методом із вищеперерахованих є термографічний метод медичної діагностики, який використовує в якості параметра контролю інтенсивність власного інфрачервоного випромінювання з поверхні тіла людини, дозволяє оперативно та необтяжливо для обстежуємого виявити патологічний процес, що пов'язаний з порушенням поверхневого теплового балансу [8].

Можливості застосування термографії для виявлення порушення кровообігу дистальних відділів кінцівок висвітлено в небагатьох роботах, більшість з яких порушують проблеми дослідження кровотоку в магістральних судинах нижніх кінцівок. Порушення магістрального кровотоку в артеріях нижніх кінцівок різного ступеня тяжкості призводить до зміни температури, що дає можливість досліджувати цей процес із застосуванням методу ДІТ.

Метою роботи було дослідити можливості застосування методу інфрачервоної термографії у виявленні змін теплової візуалізації нижніх кінцівок у хворих на ЦД.

Розглянемо отримані термографічні візуалізації.

На рис. 1 представлена термографічна візуалізація порушення кровопостачання II, III та IV пальців нижньої лівої кінцівки (а) та II пальця правої кінцівки (б).

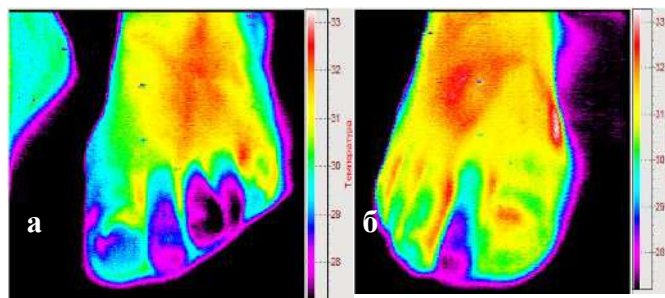


Рис. 1. Термографічна візуалізація спазму терморегуляторних судин у хворого на ЦД.

Гradient температури уражених фалангів стопи лівої кінцівки складає - $1,62^{\circ}\text{C}$, правої $-2,93^{\circ}\text{C}$. Виявлене вибіркове порушення кровообігу дистальних відділів нижніх кінцівок є характерним для захворювання на ЦД, який верифікований клінічно.

Термограма нижніх кінцівок хворого на ЦД 1-го типу представлена на рис. 2. Візуалізується порушення кровотоку магістральних судин з ознаками варикозного розширення вен нижніх кінцівок. Gradient температури ступні складає $-0,76^{\circ}\text{C}$, гомілки $-0,79^{\circ}\text{C}$. Рівень цукру в крові 12 ммоль/л . Повторне термографічне обстеження нижніх кінцівок виконано через 7 років (рис. 2, б). Візуалізується значне погіршення стану кровотоку та температурних показників. Gradient температури стопи складає $-2,53^{\circ}\text{C}$. Клінічний показник рівня цукру в крові на момент обстеження -18 ммоль/л .

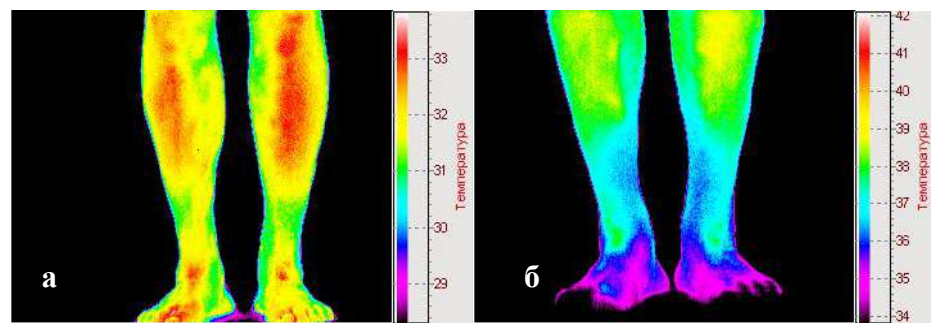


Рис. 2. Термограми нижніх кінцівок (а) повторна термограма (б) через 7 років.

Термограма нижніх кінцівок (рис. 3, а, б) хворого на ЦД 2-го типу. Клінічний показник рівня цукру коливається від $9,5$ до $5,5\text{ ммоль/л}$ в залежності від лікарських призначень та дотримання дієтичного харчування. Термографічна візуалізація нижніх кінцівок демонструє гіпо- та гіпертермічні ділянки, що говорить про наявність порушення кровотоку магістральних судин. Також було виявлено варикозне розширення вен нижніх кінцівок (ВРВ).

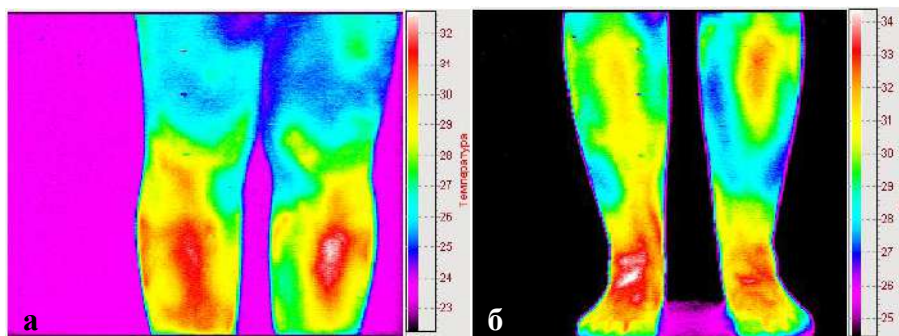


Рис. 3. Термограми та нижніх кінцівок з порушенням кровопостачання.

На рис. 4 представлена термографічна візуалізація нижніх кінцівок хворого на ЦД 2-го типу. Пацієнт скаржиться на біль та порушення чутливості в правій нижній кінцівці. На термограмі (рис. 4, а) візуалізується порушення кровопостачання правої нижньої кінцівки з зонами термоасиметрій – гіпо- та гіпертермії.

Температура передньої поверхні правої стопи (стрілка 1) на $2,03^{\circ}\text{C}$ нижче температури передньої поверхні лівої стопи (стрілка 2). Спостерігається термоасиметрія правої та лівої гомілок, різниця температур в зонах, позначених цифрами 1, 2 дорівнює $-0,94^{\circ}\text{C}$ (рис. 4, б).

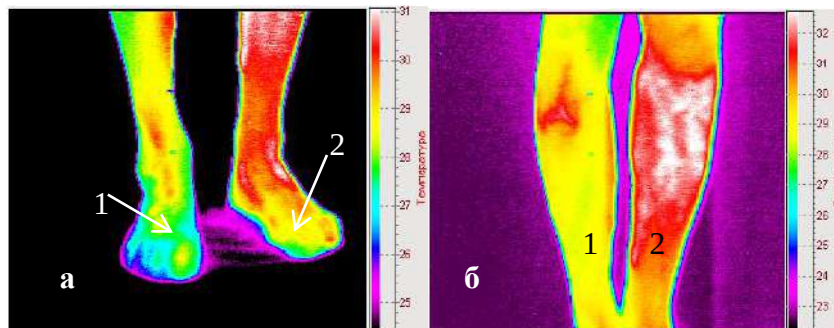


Рис. 4. Термограми нижніх кінцівок хворого на ЦД 2-го типу.

Незважаючи на порушення кровопостачання в нижніх кінцівках термографічно не візуалізується різкого зниження температури фалангів пальців. В залежності від стаціонарного та профілактичного лікування, яке пов'язане із постійним прийомом цукрознижуючих препаратів, рівень цукру в крові коливався в межах $19-14-7\text{ммоль/л}$.

Порушення кровообігу правої та лівої стопи нижніх кінцівок представлено на рис. 5.

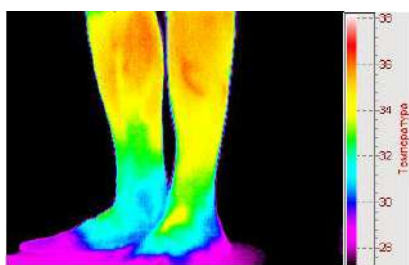


Рис. 5. ЦД 2 типу, порушення кровообігу правої та лівої кінцівки.

Хворий скаржиться на відчуття холоду в пальцях нижніх кінцівок, блідість шкіри, інколи втрату чутливості. Рівень цукру в крові на момент обстеження складає $10,7\text{ ммоль/л}$. Термографічно візуалізується термоасиметрія та зниження температури від гомілок до фалангів пальців з наступними показниками: права кінцівка: $-33,31^{\circ}\text{C}$; $-30,66^{\circ}\text{C}$; $-28,62^{\circ}\text{C}$; $-25,28^{\circ}\text{C}$; ліва кінцівка: $-33,97^{\circ}\text{C}$; $-32,69^{\circ}\text{C}$; $-31,38^{\circ}\text{C}$; $-28,34^{\circ}\text{C}$. На рис. 6, а, б термографічна візуалізація ЦД 1-го типу, порушення кровотоку магістральних судин нижніх кінцівок, термоасиметрія. Спостерігається гіпотермія нижніх кінцівок та наявність термографічного ефекту «термоампутация» першого та другого пальців лівої кінцівки. Температурні показники кінцівок складають: права: $-24,46^{\circ}\text{C}$; $-25,34^{\circ}\text{C}$; $-25,38^{\circ}\text{C}$; $-25,34^{\circ}\text{C}$; ліва: $-24,10^{\circ}\text{C}$; $-24,93^{\circ}\text{C}$; $-25,34^{\circ}\text{C}$; $-25,32^{\circ}\text{C}$.

На рис. 7 спостерігаємо зниження температури правої та лівої стопи з одночасним різким зниженням температури фалангів пальців. Термографічно візуалізується поступове зниження температури лівої гомілки ($26,59^{\circ}\text{C}$) до фалангів пальців лівої ступні з проявом ефекту «термоампутации» фалангів

пальців та зниження температури правої гомілки від 28,79°C до 23,38°C в правій ступні

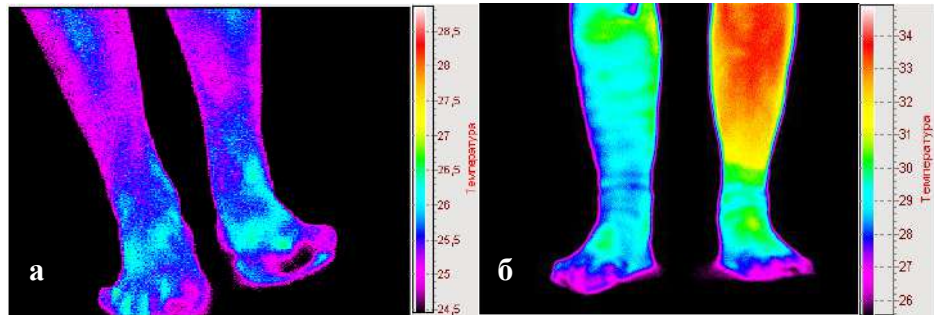


Рис. 6. ЦД 1-го типу, порушення кровотоку магістральних судин нижніх кінцівок, «термоампутація» першого та другого пальців лівої нижньої кінцівки.

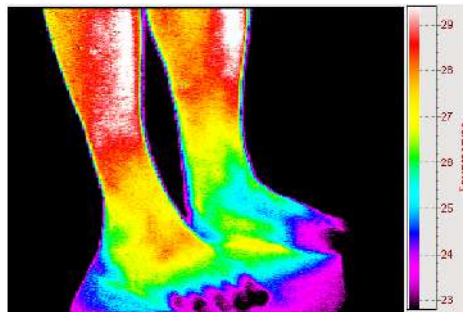


Рис. 7. ЦД 2-го типу. Термоампутація фалангів пальців лівої ступні.

В патогенезі розвитку СДС важливе місце відводиться трьом основним факторам: нейропатії, ураженню судин нижніх кінцівок, інфекції. Останній фактор, як правило, виступає супутнім двом першим. Нейропатія може призводити до виникнення нейропатичної виразки, яка може призвести в подальшому до виникнення гангрени. Ступінь кровопостачання нижніх кінцівок є одним із найважливіших критеріїв стосовно ймовірності загоєння виразок та ран у випадку СДС. Отримані результати термографічних досліджень хворих на ЦД значно поглиблюють розуміння викладеної проблеми та її негативних наслідків на організм – гострих та хронічних ускладнень [8].

Дослідження температурно-біологічних аспектів ЦД та його ускладнення – СДС є надзвичайно актуальним та ефективним методом раннього виявлення температурних змін в нижніх кінцівках, яке досягається шляхом застосування ДІТ. Під час виявлення початкових стадій ЦД необхідно здійснювати дослідження кровообігу магістральних судин нижніх кінцівок з періодичністю один раз на рік.

Термографічна діагностика надає можливість неінвазивно, необтяжливо для пацієнта проводити динамічне спостереження за процесом лікування, загоєнням нейропатичної виразки та своєчасно вносити корективи стосовно лікарських призначень.

Висновки. Проведене дослідження показало можливості методу дистанційної інфрачервоної термографії у виявленні різних форм порушення кровопостачання в нижніх кінцівках хворих на цукровий діабет.

Термографічне виявлення порушення кровопостачання в нижніх кінцівках у більшості пацієнтів спостерігається у поєднанні з іншими факторами ризику – варикозним розширенням вен, наявністю виразок, макроангіопатією. Неспроможність капілярного кровообігу є одним із провідних факторів у розвитку грубих трофічних порушень у хворих на цукровий діабет.

Для своєчасного виявлення патології системи мікро- та макроциркуляції доцільно використовувати метод дистанційної інфрачервоної термографії як один із сучасних неінвазивних методів дослідження для визначення тактики комплексного лікування та прогнозу збереження кінцівки у хворого із синдромом діабетичної стопи.

Доцільно впровадити в лікарську практику дослідження температурно-біологічних аспектів проявів цукрового діабету з періодичністю один раз на рік.

Ключові слова: термографія, цукровий діабет, градієнт температури, діабетична стопа.

Література

- [1] Манасрах Рашід Х. Р. «Хірургічне лікування артеріальної недостатності нижніх кінцівок при цукровому діабеті 2 типу», дис. д-ра філософії, 14.01.03, Київ, 2024, 216с.
- [2] Т. Х. Бакалюк, Н. Р. Макачук, Х. М. Сенюк, Г. О. Стельмах та А. Сверстюк, «Оцінка ефективності реабілітації при синдромі діабетичної стопи», *Запорізький медичний журнал*, т. 25, № 2, с. 115–121, березень 2023. doi:10.14739/2310-1210.2023.2.267251
- [3] M. Edmonds, «A renaissance in diabetic foot care: new evidence-based treatments. *Lancet*», *Diabetes Endocrinol.*, 2018, 6 (11): 837–838. doi:10.16/S2213-8587 (18)30262-6.
- [4] S. Sawatdee, K. Choochuay, W. Chanthorn, et al. «Evaluation of the topical spray containing *Centella asiatica* extract and its efficacy on excision wounds in rats», *Acta Pharm.*, 2016, 66 (2): 233-244. doi:1515/acph-2016-0018.
- [5] M. Gorobeiko, «Anticoagulation therapy with bemiparin in combination treatment of patients with diabetic peripheral neuropathy and latent ischemia of lower limb tissues», *Miznarodnij Endokrinol. Zurnal*, т. 5(61), с. 18-21, 2022, doi:10.22141/2224-0721.5.61.2014.76845
- [6] Д. Ю. Шаповалов, «Вибір методики реваскуляризації у хворих на ішемічну діабетичну стопу», *Clin. and prev. med.*, вип. 4, с. 18-26. doi:10.31612/2616-4868.4(18).2021.03
- [7] В. С. Заремба, Н. Р. Федчишин, Р. Л. Бохонко, Г. І. Герич, «Деякі аспекти діагностики та лікування синдрому діабетичної стопи», *Шпит. хірургія. Журн. ім. Л. Я. Ковальчука*, № 4, с. 63-66, 2019. doi:10.11603/2414-4533.2019.4.10712
- [8] М. В. Гульчій, С. С. Назарчук, В. І. Дунаєвський, В. Й. Котовський, В. І. Тимофеев, «Контроль стану кровообігу нижніх кінцівок у хворих на цукровий діабет», *Міжнародний ендокринологічний журнал*, т. 14, №8, с. 64-70, 2018, doi: 10.22141/2224-0721.14.8.2018.154858.