DOI 10.11603/1811-2471.2025.v.i2.15306
УДК 616.8-009.8-073.43 (047.1)

©В. З. Головатий https://orcid.org/0009-0005-7641-9179

Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, Тернопіль, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДІАГНОСТИКИ ДІАБЕТИЧНОЇ НЕЙРОПАТІЇ У ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

РЕЗЮМЕ. Цукровий діабет (ЦД) є однією з найважливіших проблем сучасної медицини. Його ускладнення, зокрема діабетична периферична нейропатія (ДПН), значно погіршують якість життя пацієнтів і збільшують економічний тягар для системи охорони здоров'я. Рання діагностика ДПН є критично важливою для запобігання серйозним ускладненням, таким як виразки стопи та ампутації. Традиційні методи, як-от електронейроміографія (ЕНМГ), є дорогими, інвазивними та не завжди доступними, особливо на первинній ланці медичної допомоги. Цей огляд узагальнює дані про ефективність ультразвукової діагностики ДПН на основі наявних досліджень. Ультразвукова діагностика, як неінвазивний, більш доступний і економічно ефективний метод, демонструє високу ефективність у виявленні структурних змін периферичних нервів, що робить її перспективною альтернативою для клінічної практики. Інтеграція нових технологій, таких як еластографія зсувної хвилі (SWE) та штучний інтелект (ШІ), може ще більше підвищити точність цього методу.

Мета – систематизація та аналіз наукових даних щодо ефективності ультразвукової діагностики у виявленні діабетичної нейропатії у пацієнтів із цукровим діабетом. Огляд спрямований на оцінку діагностичної цінності ультразвуку, порівняння його з іншими методами (ЕНМГ, МРТ), оцінку перспективності нових технологій (еластографії зсувної хвилі – SWE) та визначення його місця в клінічній практиці.

Матеріал і методи. Для підготовки огляду було проведено пошук літератури у базах даних PubMed, Scopus та Web of Science за період з 2015 по 2024 рік. Використовували такі ключові слова: "diabetic neuropathy", "ultrasound", "peripheral nerves", "cross-sectional area". До огляду включено оригінальні дослідження та систематичні огляди, які оцінювали ефективність ультразвукової діагностики ДПН у порівнянні з ЕНМГ чи клінічними шкалами, мали чіткі діагностичні критерії та щонайменше 30 учасників. Статті з недостатньо обґрунтованою методологією (наприклад, без контрольної групи чи валідованих методик) не включалися. Огляд базується на синтезі даних із 25 досліджень, у тому числі 10 систематичних оглядів та мета-аналізів, опублікованих у 2015–2024 роках.

Результати. Ультразвукова діагностика є ефективним методом виявлення ДПН. Дослідження показують, що площа поперечного перерізу (CSA) периферичних нервів, зокрема великогомілкового, збільшується у пацієнтів з ДПН. Чутливість ультразвуку становить 80–90 %, а специфічність – 75–85 %, що є зіставним із показниками ЕНМГ (чутливість 85–95 %, специфічність 80–90 %). Ультразвук переважає за доступністю та неінвазивністю, але поступається ЕНМГ у виявленні функціональних порушень. МРТ має вищу точність (93,89 %), але є дорожчою. Нові методи, як-от еластографія зсувної хвилі (SWE), підвищують ефективність діагностики, досягаючи чутливості 75 % і специфічності 86 %, а інтеграція штучного інтелекту (ШІ) показала AUC 0,926 у діагностиці спорідненних станів.

Висновки. Ультразвукова діагностика є цінним методом для виявлення діабетичної нейропатії завдяки високій чутливості, специфічності та доступності. Вона може бути альтернативою ЕНМГ у клінічній практиці, особливо в умовах обмежених ресурсів, наприклад, на первинній ланці медичної допомоги. Для її широкого впровадження рекомендовано стандартизувати діагностичні критерії (наприклад, порогові значення CSA) та забезпечити підготовку спеціалістів. Перспективи розвитку методу пов'язані з інтеграцією еластографії зсувної хвилі та штучного інтелекту, які можуть підвищити точність діагностики, що потребує подальших досліджень у великих когортах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ультразвук; цукровий діабет; діабетична полінейропатія; периферичні нерви; площа поперечного перерізу; огляд.

Вступ. За даними Міжнародної діабетичної асоціації (2021), цукровий діабет (ЦД) уражає 2,35 млн осіб в Україні серед дорослого населення віком 20–79 років, а прогнозоване зростання захворюваності до 2030 року свідчить про посилення цієї проблеми [1]. У світі ЦД залишається однією з провідних причин смертності, швидкість зростання якої переважає у країнах із середнім та низьким рівнями доходів [2]. Витрати на лікування діабету та його ускладнень у деяких країнах можуть становити до 15 % загальних витрат на охорону здоров'я [3], із прогнозованим зростанням у 2020–2030 рр. [4], що значно збільшить економічне навантаження на сферу охорони здоров'я. У цьому контексті ультразвукова діагностика розглядається як перспективний метод раннього виявлення ДПН, що й стало предметом цього огляду.

Цукровий діабет (ЦД) 1-го та 2-го типів часто супроводжується ускладненнями, які уражають периферичну та вегетативну нервову систему. Одним із таких ускладнень є діабетична нейропатія (ДН) – стан, що виникає внаслідок мікросудин-

них порушень. Цей розлад зумовлений тривалим підвищенням рівня глюкози в крові (гіперглікемією), що призводить до пошкодження нервових волокон. Залежно від характеру ураження, ДН може проявлятися дифузними або вогнищевими неврологічними синдромами, вражаючи різні анатомічні ділянки.

Тривалість діабету та рівень глікованого гемоглобіну (HbA1c) є основними прогностичними факторами діабетичної нейропатії [5]. Хронічна гіперглікемія призводить до накопичення продуктів глікозилювання, активації поліолового шляху, оксидативного стресу та мікросудинних уражень, які, у свою чергу, викликають ендоневральний набряк, демієлінізацію та втрату аксонів [6]. Ці процеси призводять до збільшення площі поперечного перерізу (CSA) нервів, підвищення їхньої ехогенності та втрати нормальної архітектури окремих пучків нервових волокон (фасцикул).

Діабетична периферична нейропатія (ДПН) є одним із найчастіших ускладнень ЦД, поширеність її залежить від типу діабету і становить близько 30 % серед пацієнтів із ЦД 1-го типу та 40 % серед пацієнтів із ЦД 2-го типу [7]. ДПН діагностується у 35 % пацієнтів на момент первинного встановлення діагнозу ЦД 2-го типу, а її поширеність корелює з віком пацієнта та тривалістю захворювання [8].

ДПН характеризується втратою чутливості, болем, поколюванням у нижніх кінцівках, що підвищує ризик травм, виразок, гангрени та ампутацій, значно погіршує якість життя пацієнтів і накладає суттєві фінансові тягарі на систему охорони здоров'я [9, 10]. Ці ускладнення також призводять до підвищення рівня смертності, яка через 5 і 10 років серед пацієнтів із діабетичними виразками стопи відповідно становить 22 % та 71 % [11].

Рання діагностика, моніторинг тяжкості та прогресування захворювання повинні ґрунтуватись на чутливих, швидких та відносно недорогих тестах [12]. Діагностика нейропатії проводиться пацієнтам із ЦД 1-го типу тривалістю більше 5 років, на момент встановлення ЦД 2-го типу та щорічно в подальшому. Ця оцінка включає ретельний збір анамнезу, оцінку тактильної (використовуючи монофіламент 10 г) або больової чутливості, вібраційної чутливості (за допомогою 128-Гц камертона) [13].

Для подальшої оцінки використовуються шкали клінічної оцінки, зокрема «Мічиганський інструмент скринінгу нейропатії (Michigan Neuropathy Screening Instrument, MNSI)», «Торонтська шкала клінічної нейропатії (Toronto Clinical Neuropathy Score, TCNS)», її модифікована версія тощо. Ці шкали мають високу чутливість та специфічність. Згідно з опублікованими дослідженнями, найвищі показники чутливості та специфічності мала mTCNS (модифікована Торонтська шкала клінічної нейропатії), чутливість та специфічність якої (згідно з ROC-аналізом) складала 98,0 % та 97,0 % відповідно [14]. Проте дані більше зосереджені на оцінці великих волокон, ніж на малих, що може обмежити їх ефективність у виявленні ранньої сенсорної нейропатії, яка часто пов'язана з малими волокнами [15].

Як правило, використання даних методів є достатнім для встановлення діагнозу та оцінки ризику подальших ускладнень, а використання електронейроміографії (ЕНМГ) рекомендовано в складних та клінічно нетипових випадках [16]. ЕНМГ демонструє характерні порушення проведення нервового імпульсу, що проявляються зниженням швидкості проведення імпульсу по сенсорних та моторних нервах (SNCV, MCV), зменшенням амплітуди сенсорного нервового потенціалу дії (SNAP) та складного м'язового потенціалу дії (CMAP), збільшенням дистальної латентності (DL) та подовженням мінімальної латентності F-хвилі, що вказує на залучення як аксональної, так і демієлінізуючої патології нервів у пацієнтів із діабетичною периферичною нейропатією [17].

Електрофізіологічне дослідження на даний час є найкращим методом кількісної оцінки периферичної нейропатії, порівняно з усіма іншими методами [17] навіть на субклінічній стадії [18], проте вони часто не доступні на первинній ланці медичної допомоги і мають обмеження при діагностиці дрібних гілок нервів.

Використання високочастотного ультразвукового обстеження допомагає подолати ці обмеження та детально оцінити морфологічні особливості периферичних нервів. Цей метод дозволяє візуалізувати структуру нервів та їх диференціацію на окремі фасцикули, діаметр, оцінити показники кровопостачання та еластичності, структурні зміни оточуючих тканин [19, 20]. Основні зміни нервів у пацієнтів із ДПН включають збільшення площі поперечного перерізу нервів (CSA), втрату внутрішньої структури, зниження ехогенності та потовщення епіневрію, що вказують на наявність патологічних процесів, таких як демієлінізація та аксональна атрофія [21].

У статті Tandon A. та співавторів, опублікованій у 2021 році, представлені результати ультразвукового дослідження периферичних нервів у 70 дорослих пацієнтів із цукровим діабетом 2-го типу та 30 здорових осіб із контрольної групи. Дослідження охоплювало серединний, ліктьовий, загальний малогомілковий та великогомілковий нерви. Основні висновки свідчать, що середня площа поперечного перерізу (CSA) цих нервів була значно більшою у пацієнтів як із діабетич-

ною, так і з недіабетичною полінейропатією, порівняно з контрольною групою (p<0,001). Крім того, у безсимптомних пацієнтів із діабетом виявлено ультразвукові зміни в периферичних нервах, що вказує на те, що морфологічні зміни передують появі клінічних симптомів [22].

Площа поперечного перерізу (CSA) прямо корелює з тяжкістю нейропатії, тривалістю ЦД, рівнем HbA1c, а також з показниками нервової провідності, такими як латентність та швидкість проведення імпульсів [23].

Унаслідок того, що довгі аксони нижніх кінцівок більш схильні до пошкоджень, клінічно спочатку та переважно ДПН розвивається в стопах, згодом прогресує, досягаючи колін, поширюється проксимально та уражає верхні кінцівки із типовим розподілом «stocking-glove» («панчохи-рукавички») [10, 24]. Перші ознаки діабетичної нейропатії виявляються в дистальних сенсорних нервах, таких як литковий чи підошвові нерви, що підтверджується електрофізіологічними дослідженнями [17, 25].

Опублікований у 2024 році мета-аналіз із 32 ультразвукових досліджень протягом 2015–2023 років площі поперечного перерізу (CSA) литкового нерва показав, що його середній CSA був значно вищим лише у пацієнтів із ЦД та ДПН і становив у середньому 4,29 мм² (CI [2,23, 6,35] мм²), порівняно зі здоровими особами в усіх регіонах та сукупності, для яких середнє значення CSA становило 2,63 мм² (інтервал довіри [CI] 2.41, 2,85 мм²) [26].

Натомість опубліковане у 2023 році дослідження, що включало 111 пацієнтів з ЦД 2-го типу, в порівнянні зі 104 здоровими дорослими та 41 пацієнтом з ХЗДП (хронічною запальною демієлінізуючою полінейропатією) показало, що при ультразвуковій оцінці блукаючого нерва у пацієнтів ЦД 2-го типу та наявною ДПН площа поперечного перерізу (CSA) нерва на рівні середньої третини шиї не відрізнялась у пацієнтів з ДПН та без неї [27], не залежала від товщини комплексу інтима-медіа сонної артерії чи навіть була меншою внаслідок атрофії [28].

Дані результати підтверджують, що первинні зміни при ДПН проявляються саме в дистальних нервах нижніх кінцівок, де збільшується їх площа поперечного перерізу через набряк і демієлінізацію.

Поперечний переріз великогомілкового нерва (CSA) є ще одним із важливих показників у діагностиці діабетичної периферичної нейропатії (ДПН). Проведений мета-аналіз 48 досліджень, які охопили 2695 здорових суб'єктів, підсумовує , що у здорових дорослих Ф CSA великогомілкового нерва на рівні щиколотки становить 10,9 мм² (95 % ДІ: 9,9–11,8 мм²), і воно не повинно перевищувати 11,8 мм² у нормі [29]. Зокрема, середнє значення CSA у пацієнтів з ЦД та ДПН становить 15,12 мм², тоді як у пацієнтів з ЦД без нейропатії – 13,39 мм² (графік № 1) [30]. Дослідження Oduola-Owoo et al. (2023) підтверджує, що CSA великогомілкового нерва є більшим у пацієнтів з ДПН, порівняно з контрольною групою, що узгоджується з результатами Senarai et al. (2022) (рис. 1) [31].

Однак клінічна корисність цього показника обмежена через високу міждослідницьку гетерогенність (I^2 = 99,65 %) і вплив таких факторів, як вік та ІМТ, що потребує врахування при інтерпретації результатів [30].

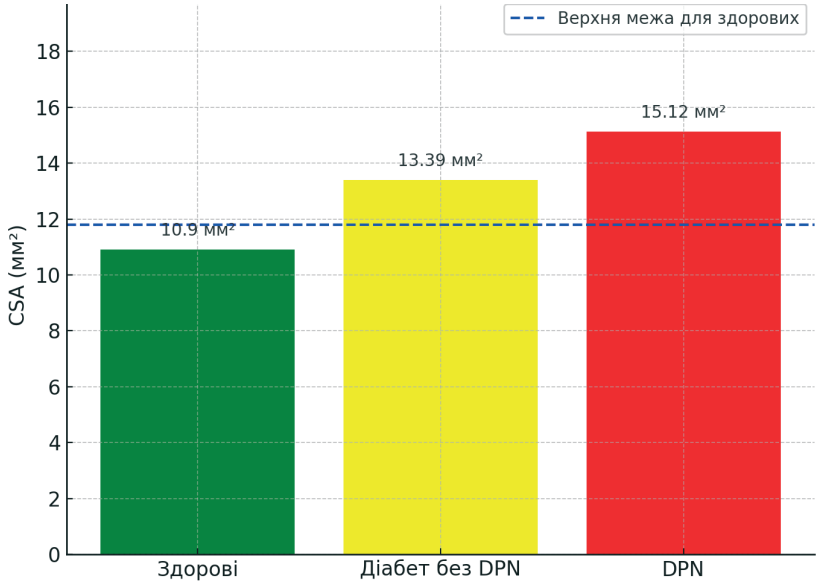

Рис. 1. CSA великогомілкового нерва у різних групах. Графік № 1: середня площа поперечного перерізу (CSA) велокогомілкового нерва на рівні щиколотки за даними мета-аналізів Senarai et al. (2022) та Senarai et al. (2023). Горизонтальна лінія позначає пограничну верхню межу норми CSA для здорових дорослих (11,8 мм²).

Роль нових технологій (SWE, SSI, ШІ)

Еластографія, зокрема метод зсувної хвилі (SWE), є перспективним інструментом для ранньої діагностики діабетичної периферичної нейропатії (ДПН), доповнюючи традиційну оцінку площі поперечного перерізу нервів. Цей неінвазивний метод застосовує ультразвук для вимірювання жорсткості тканин шляхом аналізу швидкості зсувних хвиль, де вища швидкість свідчить про більшу щільність тканини й потенційні патологічні зміни при ДПН. Однак SWE має обмеження, зокрема залежність результатів від кваліфікації оператора, потребу в спеціалізованому обладнанні та можливі труднощі з інтерпретацією даних через індивідуальні особливості пацієнтів.

Мета-аналіз, проведений у 2022 році, до якого увійшло 6 досліджень, показав сумарну чутливість і специфічність SWE для жорсткості великогомілкового нерва 75 % (95 % довірчий інтервал [ДІ]: 68–80 %) і 86 % (95 % ДІ: 80–90 %) відповідно, а сумарний AUROC становив 0,84 (95 % ДІ: 0,81–0,87) для діагностики ДПН, що підкреслює надійність вимірювань [32].

Дослідження 2021 року включало 41 пацієнта з ДПН, 42 без ДПН та 21 здорового добровольця, в яких вимірювали жорсткість та площу поперечного перерізу (CSA) великогомілкового нерва за допомогою звичайного УЗД та зсувно-хвильової еластографії (SWE). Жорсткість нерва (середня, мінімальна, максимальна еластичність) була значно вищою у пацієнтів з ДПН ($P<0,05$), тоді як CSA менше відрізнялось між групами ($P>0,05$). Найчутливішим показником для ДПН було середнє значення еластичності (71,3 кПа; чутливість – 68,3 %, AUC – 0,712). Найвищу точність забезпечило поєднання SWE з Торонтською клінічною шкалою (TCSS), досягнувши чутливості 100 % і специфічності 95,24 % при максимальній еластичності (EMax) [33].

У цьому контексті перспективним методом є Supersonic Shear Imaging (SSI), вдосконалена форма SWE, яка завдяки своїй здатності точно вимірювати жорсткість тканин може ще більше підвищити ефективність ранньої діагностики ДПН, доповнюючи морфологічні дані традиційного ультразвуку. Мета-аналіз 12 досліджень (1325 учасників) показав, що вимірювання жорсткості великогомілкового нерва методом SSI для діагностики ДПН має чутливість 80 % (95 % ДІ: 73–86 %), специфічність 86 % (95 % ДІ: 82–89 %) та площу під кривою SROC 0,90 (95 % ДІ: 0,87–0,92) [34], що є більш чутливим методом діагностики.

Прогресивний розвиток штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання протягом останніх років відкриває нові можливості в діагностиці численних захворювань, підвищуючи її точність. Штучний інтелект (ШІ) відіграє дедалі важливішу роль у діагностиці діабетичної нейропатії (ДН), зокрема завдяки інтеграції з ультразвуковими технологіями, що дозволяють аналізувати структурні зміни периферичних нервів із високою точністю.

У дослідженні, опублікованому в 2021 році, для діагностики синдрому зап'ясткового каналу була використана автоматизована комп'ютерна система, яка показала вищу ефективність проти 2 досвідчених радіологів із AUC 0,926 [35]. Робота Yang et al. (2023) засвідчила, що машинне навчання може досягти 84,6 % точності, 90,2 % чутливості та 76,7 % специфічності при діагностиці ДПН за допомогою зниження мікроциркуляторних параметрів [36].

Роль МРТ у діагностиці ДПН

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) стає перспективним методом у діагностиці та моніторингу діабетичної периферичної нейропатії (ДПН). Дослідження показали, що при ДПН, окрім збільшення CSA периферичних нервів, що також характерно для УЗД, МРТ здатна виявляти внутрішньонервові зміни, такі як набряк або демієлінізація, шляхом аналізу сигналу в Т2-зважених зображеннях [37]. Попри те, що точність МРТ у діагностиці ДПН сягає 93,89 %, що перевищує показники високочастотного ультразвукового дослідження, її широке застосування обмежується високою вартістю, тривалістю процедури та необхідністю спеціалізованого обладнання. Через це ультразвукове дослідження залишається доступнішою альтернативою для скринінгу пацієнтів, тоді як МРТ може використовуватися для уточнення діагнозу у складних випадках [38].

Обговорення. Ультразвукова діагностика ДПН має низку переваг, включаючи доступність, економічну ефективність, неінвазивність та можливість моніторингу захворювання. Порівняно з ЕНМГ, ультразвук може бути менш точним у виявленні функціональних порушень, але його використання як скринінгового методу може значно покращити ранню діагностику ДПН, особливо в умовах обмежених ресурсів. Наприклад, використання УЗД може допомогти ідентифікувати пацієнтів із субклінічними змінами CSA нервів (CSA >11,8 мм² для великогомілкового нерва), що дозволяє розпочати профілактичні заходи до появи виразок стопи.

МРТ, хоча й має вищу точність, є менш доступною через високу вартість і тривалість процедури, що обмежує її використання як первинного методу.

Інтеграція нових технологій, таких як еластографія зсувної хвилі (SWE) та її вдосконалена форма Supersonic Shear Imaging (SSI), може підвищити точність та ефективність ультразвукової діагнос-

тики, особливо на ранніх стадіях захворювання. Оскільки чутливість еластографії зсувної хвилі (SWE) нижча за показники CSA, а специфічність вища, це робить SWE менш універсальним як самостійний метод діагностики, порівняно зі звичайним ультразвуком. Це вказує на те, що метод SWE не завжди призначений для самостійного використання, а радше слугує доповненням до інших діагностичних підходів, тоді як звичайний ультразвук залишається достатньо ефективним сам по собі.

Штучний інтелект (ШІ) відкриває нові можливості для автоматизованого аналізу ультразвукових зображень, що може зменшити суб'єктивність і підвищити точність діагностики.

Однак широке впровадження ультразвуку потребує стандартизації діагностичних критеріїв, урахування демографічних факторів (вік, ІМТ) та підготовки спеціалістів. Подальші дослідження мають зосередитися на розробці стандартизованих протоколів, оцінці SWE у великих когортах, впливу та інтеграції ШІ у рутинну діагностику.

Висновки. На основі здійсненого огляду наукової літератури можна стверджувати, що ультразвукова діагностика (УЗД) є надзвичайно результативним, неінвазивним і економічно виправданим способом виявлення ДПН у осіб із ЦД. Для покращення результатів лікування пацієнтів з ДПН необхідно зосередитися на ранній діагностиці, точній оцінці прогресування захворювання та інформуванні пацієнтів про ризик розвитку виразок на стопах.

УЗД може стати ключовим інструментом первинного скринінгу ДПН, особливо там, де доступ до електронейроміографії (ЕНМГ) обмежений, що сприяє своєчасній діагностиці, поліпшенню результатів терапії та зменшенню фінансового тиску на системи охорони здоров'я. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям у медицині, які наголошують на доступності, інноваціях та орієнтації на потреби пацієнтів.

Подальші дослідження та розвиток технологій ультразвукової діагностики сприятимуть поліпшенню результатів лікування та подоланню труднощів, пов'язаних з цим захворюванням.

Джерела фінансування: Власні кошти автора.

Внесок автора:

В. З. Головатий – формування концепції дослідження, розробка ідеї та дизайну дослідження, проведення огляду літератури та написання тексту.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

ЛІТЕРАТУРА

1. IDF Diabetes Atlas, 10th edn. URL: https://diabetesatlas.org/atlas-reports/.

2. Global burden of type 2 diabetes mellitus from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2044: a systematic analysis across SDI levels for the global burden of disease study 2021 / K. J. He et al. *Front Endocrinol*. 2024. Vol. 15. P. 1501690.

3. Association of Medical Financial Hardship and Mortality Risk among US Adults / F. Chen et al. *J Gen Intern Med.* 2024.

4. Projected rapid growth in diabetes disease burden and economic burden in China: a spatio-temporal study from 2020 to 2030 / J. Liu et al. *Lancet Reg Health - West Pac*. 2023. Vol. 33. P. 100700.

5. Vascular risk factors and diabetic neuropathy / S. Tesfaye et al. *N Engl J Med.* 2005. Vol. 352, No. 4. P. 341–350.

6. A Comprehensive Review of Neuronal Changes in Diabetics / R. Luna et al. *Cureus*. 2021. Vol. 13, No. 10.

7. Prevalence and Risk Factors for Diabetic Peripheral Neuropathy Among Saudi Hospitalized Diabetic Patients: A Nested Case-Control Study / F. A. Aleidan et al. *Int J Gen Med*. 2020. Vol. 13. P. 881–889.

8. Andrei Cristian B., Amorin Remus P. Diabetic Neuropathy Prevalence and Its Associated Risk Factors in Two Representative Groups of Type 1 and Type 2 Diabetes Mellitus Patients from Bihor County. *Maedica*. 2018. Vol. 13, No. 3. P. 229–234.

9. Diabetic peripheral neuropathy: advances in diagnosis and strategies for screening and early intervention / D. Selvarajah et al. *Lancet Diabetes Endocrinol*. 2019. Vol. 7, No. 12. P. 938–948.

10. Diabetic neuropathy / E. L. Feldman et al. *Nat Rev Dis Primer*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 1–18.

11. Long term outcomes after incident diabetic foot ulcer: Multicenter large cohort prospective study (EDIFOCUS investigators) epidemiology of diabetic foot complications study: Epidemiology of diabetic foot complications study / A. Rastogi et al. *Diabetes Res Clin Pract*. 2020. Vol. 162. P. 108113.

12. Pelosi L. Nerve ultrasound – A screening tool for diabetic neuropathy. *Clin Neurophysiol Pract*. 2023. Vol. 8. P. 113–114.

13. American Diabetes Association Professional Practice Committee. 12. Retinopathy, Neuropathy, and Foot Care: Standards of Care in Diabetes 2025. *Diabetes Care*. 2024. Vol. 48, Supplement_1. P. S252–S265.

14. Clinical Neuropathy Scales in Neuropathy Associated with Impaired Glucose Tolerance / L. A. Zilliox et al. *J Diabetes Complications*. 2015. Vol. 29, No. 3. P. 372–377.

15. Clinical neuropathy scales in neuropathy associated with impaired glucose tolerance / L. A. Zilliox et al. *J Diabetes Complications*. 2015. Vol. 29, No. 3. P. 372–377.

16. Уніфікований клінічний протокол первинної та спеціалізованої медичної допомоги «Цукровий діабет 2 типу у дорослих» / Міністерство охорони здоров'я України, Державний експертний центр МОЗ України. [Електронний ресурс]. 2024. Режим доступу: https://www.dec.

gov.ua/wp-content/uploads/2024/07/1300_24072024_ykpmd_diabet_2.pdf.

17. Electrophysiological measurements of diabetic peripheral neuropathy: A systematic review / D. Shabeeb et al. *Diabetes Metab Syndr Clin Res Rev.* 2018. Vol. 12, No. 4. P. 591–600.

18. Presence of subclinical polyneuropathy in patients with elevation of HbA1c / Y. Çetinkaya et al. *Arch Neuropsychiatry.* 2023.

19. Wee T. C., Wee T. C., Simon N., Simon N. G. Ultrasound elastography for the evaluation of peripheral nerves: A systematic review. *Muscle Nerve.* 2019.

20. Ultrasonographic Evaluation of Peripheral Nerves / Z. S. Ali et al. *World Neurosurg.* 2016.

21. High resolution ultrasonography of peripheral nerves in diabetic patients to evaluate nerve cross sectional area with clinical profile / S. Narayan et al. *Br J Radiol.* 2021. Vol. 94, No. 1121. P. 20200173.

22. High resolution ultrasound in subclinical diabetic neuropathy: A potential screening tool / A. Tandon et al. *Ultrasound.* 2020.

23. Metwally E. S., Ali K. A. M., Abdel-Baqy R. S. A. High Resolution Ultrasound of the Tibial Nerve in Diabetic Peripheral Neuropathy. *QJM Int J Med.* 2021. Vol. 114, Supplement_1. P. hcab106.061.

24. Painful and non-painful diabetic polyneuropathy: Clinical characteristics and diagnostic issues / S. S. Gylfadottir et al. *J Diabetes Investig.* 2019. Vol. 10, No. 5. P. 1148–1157.

25. Whole plantar nerve conduction study: A new tool for early diagnosis of peripheral diabetic neuropathy / R. Galiero et al. *Diabetes Res Clin Pract.* 2021. Vol. 176.

26. Morphometry of the sural nerve in diabetic neuropathy: a systematic review / Z. Ludi et al. *J Ultrasound.* 2024.

27. Comparing the accuracy of ultrasound-based measurements of the cervical vagus nerve / J. Dörschner et al. *Sci Rep.* 2023. Vol. 13, No. 1. P. 884.

28. Evaluating Diagnostic Ultrasound of the Vagus Nerve as a Surrogate Marker for Autonomic Neuropathy in Diabetic Patients / B. Heilinget al. *Med Kaunas Lith.* 2023. Vol. 59, No. 3. P. 525.

29. Normative Reference Values of the Tibial Nerve in Healthy Individuals Using Ultrasonography: A Systematic Review and Meta-Analysis / T. Senarai et al. *J Clin Med.* 2023. Vol. 12(19). P. 6186. DOI: 10.3390/jcm12196186.

30. Cross-Sectional Area of the Tibial Nerve in Diabetic Peripheral Neuropathy Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of Ultrasonography Studies / T. Senarai et al. *Medicina (Mex).* 2022. Vol. 58, No. 12. P. 1696.

31. Posterior Tibial Nerve Ultrasound Assessment of Peripheral Neuropathy in Adults with Type 2 Diabetes Mellitus / L. T. Oduola-Owoo et al. *J Med Ultrasound.* 2023. Vol. 32, No. 1. P. 62–69.

32. Shear wave elastography as a quantitative biomarker of diabetic peripheral neuropathy: A systematic review and meta-analysis / B. Dong et al. *Front Public Health.* 2022. Vol. 10. P. 915883.

33. Value of shear wave elastography combined with the Toronto clinical scoring system in diagnosis of diabetic peripheral neuropathy / F. Wang et al. *Medicine (Baltimore).* 2021. Vol. 100, No. 35. P. e27104.

34. Supersonic shear wave imaging of the tibial nerve for diagnosis of diabetic peripheral neuropathy: A meta-analysis / Y. Chen et al. *Front Endocrinol.* 2022.

35. Accurate automated diagnosis of carpal tunnel syndrome using radiomics features with ultrasound images: A comparison with radiologists' assessment / F. Faeghi et al. *Eur J Radiol.* 2021. Vol. 136. P. 109518.

36. Machine learning models for diabetic neuropathy diagnosis using microcirculatory parameters in type 2 diabetes patients / X. Zhang et al. *Int Angiol J Int Union Angiol.* 2023. Vol. 42, No. 3. P. 191–200.

37. Diffusion tensor imaging MR Neurography detects polyneuropathy in type 2 diabetes / M. Vaeggemose et al. *J Diabetes Complications.* 2020. Vol. 34, No. 2. P. 107439.

38. Can imaging be the new yardstick for diagnosing peripheral neuropathy? a comparison between high resolution ultrasound and MR neurography with an approach to diagnosis / A. Agarwal et al. *Insights Imaging.* 2019. Vol. 10, No. 1. P. 104.

REFERENCES

1. IDF Diabetes Atlas, 10th edn [Internet]. URL: https://diabetesatlas.org/atlas-reports/

2. He KJ, Wang H, Xu J, Gong G, Liu X, Guan H. Global burden of type 2 diabetes mellitus from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2044: a systematic analysis across SDI levels for the global burden of disease study 2021. Front Endocrinol. 2024 Nov 8;15:1501690.

3. Chen F, Nipp RD, Han X, Zheng Z, Yabroff KR, Jiang C. Association of Medical Financial Hardship and Mortality Risk among US Adults. J Gen Intern Med. 2024; URL: https://link.springer.com/10.1007/s11606-024-09135-5

4. Liu J, Liu M, Chai Z, Li C, Wang Y, Shen M, et al. Projected rapid growth in diabetes disease burden and economic burden in China: a spatio-temporal study from 2020 to 2030. The Lancet Regional Health – Western Pacific. 2023; 33:100700.

5. Tesfaye S, Chaturvedi N, Eaton SEM, Ward JD, Manes C, Ionescu-Tirgoviste C, et al. Vascular risk factors and diabetic neuropathy. N Engl J Med. 2005; 352(4):341–50.

6. Luna R, Manjunatha RT, Bollu B, Jhaveri S, Avanthika C, Reddy N, et al. A Comprehensive Review of Neuronal Changes in Diabetics. Cureus. 2021;13(10). URL: https://www.cureus.com/articles/74930-a-comprehensive- review-of-neuronal-changes-in-diabetics

7. Aleidan FA, Ahmed BA, Alotaibi FA, Aleesa DH, Alhefdhi NA, Badri M, et al. Prevalence and Risk Factors for Diabetic Peripheral Neuropathy Among Saudi Hospitalized Diabetic Patients: A Nested Case-Control Study. IJGM. 2020; 13:881–9.

8. Andrei Cristian B, Amorin Remus P. Diabetic Neuropathy Prevalence and Its Associated Risk Factors in Two Representative Groups of Type 1 and Type 2 Diabetes

Mellitus Patients from Bihor County. Maedica (Bucur). 2018;13(3):229–34.

9. Selvarajah D, Kar D, Khunti K, Davies MJ, Scott AR, Walker J, et al. Diabetic peripheral neuropathy: advances in diagnosis and strategies for screening and early intervention. The Lancet Diabetes & Endocrinology. 2019; 7(12):938–48.

10. Feldman EL, Callaghan BC, Pop-Busui R, Zochodne DW, Wright DE, Bennett DL, et al. Diabetic neuropathy. Nat Rev Dis Primers. 2019;5(1):1–18.

11. Rastogi A, Goyal G, Kesavan R, Bal A, Kumar H, Mangalanadanam, et al. Long term outcomes after incident diabetic foot ulcer: Multicenter large cohort prospective study (EDI-FOCUS investigators) epidemiology of diabetic foot complications study: Epidemiology of diabetic foot complications study. Diabetes Res Clin Pract. 2020; 162:108113.

12. Pelosi L. Nerve ultrasound - A screening tool for diabetic neuropathy. Clin Neurophysiol Pract. 2023;8:113–4.

13. American Diabetes Association Professional Practice Committee. 12. Retinopathy, Neuropathy, and Foot Care: Standards of Care in Diabetes 2025. Diabetes Care. 2024;48(Supplement_1):S252–65.

14. Zilliox LA, Ruby SK, Singh S, Zhan M, Russell JW. Clinical Neuropathy Scales in Neuropathy Associated with Impaired Glucose Tolerance. J Diabetes Complications. 2015;29(3):372–7.

15. Zilliox LA, Ruby SK, Singh S, Zhan M, Russell JW. Clinical neuropathy scales in neuropathy associated with impaired glucose tolerance. Journal of Diabetes and its Complications. 2015;29(3):372–7.

16. Ministerstvo okhorony zdorov'ya Ukrayiny, Derzhavnyy ekspertnyy tsentr MOZ Ukrayiny [Ministry of Health of Ukraine, State Expert Center of the Ministry of Health of Ukraine]. Unifikovanyy klinichnyy protokol pervynnoyi ta spetsializovanoyi medychnoyi dopomohy «Tsukrovyy diabet 2 typu u doroslykh» [Unified clinical protocol for primary and specialized medical care "Type 2 diabetes mellitus in adults"]. 2024. URL: https://www.dec.gov.ua/wp-content/uploads/2024/07/1300_24072024_ykpmd_diabet_2.pdf Ukrainian.

17. Shabeeb D, Najafi M, Hasanzadeh G, Hadian MR, Musa AE, Shirazi A. Electrophysiological measurements of diabetic peripheral neuropathy: A systematic review. Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews. 2018;12(4):591–600.

18. Çetinkaya Y, Özdemir G, Hasirci Bayir BR, Misirli CH. Presence of subclinical polyneuropathy in patients with elevation of HbA1c. Archives of Neuropsychiatry. 2023; URL: https://www.noropsikiyatriarsivi.com/submission/MakaleKontrol?Id=VFdwbk1FMVVUVDA9

19. Wee TC, Wee TC, Simon N, Simon NG. Ultrasound elastography for the evaluation of peripheral nerves: A systematic review. Muscle & Nerve. 2019;

20. Ali ZS, Ali ZS, Pisapia J, Pisapia JM, Tracy S, Ma T, et al. Ultrasonographic Evaluation of Peripheral Nerves. World Neurosurgery. 2016;

21. Narayan S, Goel A, Singh AK, Thacker AK, Singh N, Gutch M. High resolution ultrasonography of peripheral nerves in diabetic patients to evaluate nerve cross sectional area with clinical profile. Br J Radiol. 2021; 94(1121):20200173.

22. Tandon A, Khullar T, Maheshwari S, et al. High resolution ultrasound in subclinical diabetic neuropathy: A potential screening tool. Ultrasound. 2020;

23. Metwally ES, Ali KAM, Abdel-Baqy RSA. High Resolution Ultrasound of the Tibial Nerve in Diabetic Peripheral Neuropathy. QJM: An International Journal of Medicine. 2021;114(Supplement_1):hcab106.061.

24. Gylfadottir SS, Weeracharoenkul D, Andersen ST, Niruthisard S, Suwanwalaikorn S, Jensen TS. Painful and non-painful diabetic polyneuropathy: Clinical characteristics and diagnostic issues. J Diabetes Investig. 2019;10(5):1148–57.

25. Galiero R, Ricciardi D, Pafundi PC, Todisco V, Tedeschi G, Cirillo G, et al. Whole plantar nerve conduction study: A new tool for early diagnosis of peripheral diabetic neuropathy. Diabetes Research and Clinical Practice. 2021; 176. URL: https://www.diabetesresearchclinicalpractice.com/article/S0168-8227(21)00215-1/abstract

26. Ludi Z, Liau MYQ, Yong BSJ, Auyong ASY, Lynette QHT, Yeo SJ, et al. Morphometry of the sural nerve in diabetic neuropathy: a systematic review. Journal of Ultrasound. 2024;

27. Dörschner J, Pelz JO, Kerner AM, Labuschagne JJ, Hammer N, Löffler S. Comparing the accuracy of ultrasound-based measurements of the cervical vagus nerve. Sci Rep. 2023;13(1):884.

28. Heiling B, Karl A, Fedtke N, Müller N, Kloos C, Grimm A, et al. Evaluating Diagnostic Ultrasound of the Vagus Nerve as a Surrogate Marker for Autonomic Neuropathy in Diabetic Patients. Medicina (Kaunas). 2023;59(3):525.

29. Senarai T, Suwannakhan A, Pratipanawatr T, Yammine K, Yurasakpong L, Sathapornsermsuk T, et al. Normative Reference Values of the Tibial Nerve in Healthy Individuals Using Ultrasonography: A Systematic Review and Meta-Analysis. J Clin Med. 2023;12(19):6186

30. Senarai T, Pratipanawatr T, Yurasakpong L, Kruepunga N, Limwachiranon J, Phanthong P, et al. Cross-Sectional Area of the Tibial Nerve in Diabetic Peripheral Neuropathy Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of Ultrasonography Studies. Medicina. 2022;58(12):1696.

31. Oduola-Owoo LT, Adeyomoye AA, Omidiji OA, Idowu BM, Oduola-Owoo BB, Odeniyi IA. Posterior Tibial Nerve Ultrasound Assessment of Peripheral Neuropathy in Adults with Type 2 Diabetes Mellitus. J Med Ultrasound. 2023;32(1):62–9.

32. Dong B, Lyu G, Yang X, Wang H, Chen Y. Shear wave elastography as a quantitative biomarker of diabetic peripheral neuropathy: A systematic review and meta-analysis. Front Public Health. 2022;10:915883.

33. Wang F, Zheng M, Hu J, Fang C, Chen T, Wang M, et al. Value of shear wave elastography combined with the Toronto clinical scoring system in diagnosis of diabetic peripheral neuropathy. Medicine. 2021; 100(35):e27104.

34. Chen Y, Chen Y, Duan H, Duan H, Huang L, Huang L, et al. Supersonic shear wave imaging of the tibial nerve for diagnosis of diabetic peripheral neuropathy: A meta-analysis. Frontiers in Endocrinology. 2022;

35. Faeghi F, Ardakani AA, Acharya UR, Mirza-Aghazadeh-Attari M, Abolghasemi J, Ejtehadifar S, et al.

Accurate automated diagnosis of carpal tunnel syndrome using radiomics features with ultrasound images: A comparison with radiologists' assessment. Eur J Radiol. 2021;136:109518.

36. Zhang X, Sun Y, Ma Z, Lu L, Li M, Ma X. Machine learning models for diabetic neuropathy diagnosis using microcirculatory parameters in type 2 diabetes patients. Int Angiol. 2023;42(3):191–200.

37. Vaeggemose M, Haakma W, Pham M, Ringgaard S, Tankisi H, Ejskjaer N, et al. Diffusion tensor imaging MR Neurography detects polyneuropathy in type 2 diabetes. J Diabetes Complications. 2020;34(2):107439.

38. Agarwal A, Chandra A, Jaipal U, Bagarhatta M, Mendiratta K, Goyal A, et al. Can imaging be the new yardstick for diagnosing peripheral neuropathy? a comparison between high resolution ultrasound and MR neurography with an approach to diagnosis. Insights into Imaging. 2019;10(1):104.

V. Z. Holovatyi

Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Ternopil, Ukraine

EFFECTIVENESS OF ULTRASOUND DIAGNOSTICS IN DIABETIC NEUROPATHY AMONG PATIENTS WITH DIABETES MELLITUS: A LITERATURE REVIEW

SUMMARY. Diabetes mellitus (DM) represents one of the most pressing challenges in modern medicine. Its complications, particularly diabetic peripheral neuropathy (DPN), significantly impair patients' quality of life and impose a substantial economic burden on healthcare systems. Early diagnosis of DPN is critical to prevent severe complications, such as foot ulcers and amputations. Traditional diagnostic methods, such as electroneuromyography (ENMG), are costly, invasive, and often inaccessible, especially in primary healthcare settings. This literature review synthesizes evidence on the effectiveness of ultrasound diagnostics for DPN based on existing studies. As a non-invasive, more accessible, and cost-effective approach, ultrasound demonstrates high efficacy in detecting structural changes in peripheral nerves, positioning it as a promising alternative for clinical practice. The integration of advanced technologies, such as shear wave elastography (SWE) and artificial intelligence (AI), holds potential to further enhance the accuracy of this method.

The aim – to systematize and analyze scientific data on the effectiveness of ultrasound diagnostics in detecting diabetic neuropathy in patients with diabetes. The review is aimed at assessing the diagnostic value of ultrasound, comparing it with other methods (ENMG, MRI), assessing the prospects of new technologies (shear wave elastography – SWE) and determining its place in clinical practice.

Material and Methods. To prepare the review, a literature search was conducted in the PubMed, Scopus and Web of Science databases for the period from 2015 to 2024. The following keywords were used: "diabetic neuropathy", "ultrasound", "peripheral nerves", "cross-sectional area". The review included original studies and systematic reviews that evaluated the effectiveness of ultrasound diagnostics of DPN in comparison with ENMG or clinical scales, had clear diagnostic criteria and at least 30 participants. Articles with insufficiently substantiated methodology (for example, without a control group or validated methods) were not included. The review is based on a synthesis of data from 25 studies, including 10 systematic reviews and meta-analyses published between 2015 and 2024.

Results. Ultrasound is an effective method for detecting DPN. Studies show that the cross-sectional area (CSA) of peripheral nerves, particularly the tibial nerve, is increased in patients with DPN. Ultrasound has a sensitivity of 80–90 % and a specificity of 75–85 %, which is comparable to that of ENMG (sensitivity 85–95 %, specificity 80–90 %). Ultrasound is superior in terms of availability and non-invasiveness, but is inferior to ENMG in detecting functional disorders. MRI has a higher accuracy (93.89%), but is more expensive. Newer techniques, such as shear wave elastography (SWE), have improved diagnostic performance, achieving a sensitivity of 75 % and a specificity of 86 %, and the integration of artificial intelligence (AI) has shown an AUC of 0.926 in the diagnosis of related conditions.

Conclusions. Ultrasound diagnostics is a valuable method for detecting diabetic neuropathy due to its high sensitivity, specificity, and accessibility. It can be an alternative to ENMG in clinical practice, especially in resource-limited settings, such as primary care. For its widespread implementation, it is recommended to standardize diagnostic criteria (e.g., CSA thresholds) and provide training for specialists. The prospects for the development of the method are associated with the integration of shear wave elastography and artificial intelligence, which may increase diagnostic accuracy, which requires further studies in large cohorts.

KEY WORDS: Ultrasound; diabetes mellitus; diabetic polyneuropathy; peripheral nerves; cross-sectional area; review.

Отримано 22.03.2025

Електронна адреса для листування golovatui@gmail.com