

DOI 10.31718/2077–1096.24.2.257

УДК 535.8 : 612.1

Петровський О.М.¹, Соловійов В.В.¹, Соловійова Н.В.², Міщенко А.В.²,
Заколюда О.Е.², Кузнецова Т.Ю.¹**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КАПІЛЯРОСКОПІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ КРОВІ В СУДИНАХ ЛЮДИНИ**¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна² Полтавський державний медичний університет, Полтава, Україна

Дослідження судинної системи людського організму завжди звертало увагу лікарів. Починаючи з сучасної медицини, взаємне функціонування всіх ланок єдиного процесу – систем кровообігу – аналітично узагальнюється для визначення серця або венозної системи як основної ланки забезпечення кровотоку. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі: провести аналіз існуючих неінвазивних методів дослідження судинної системи людини; вдосконалити метод оптичної капіляроскопії за допомогою застосування сучасних цифрових фотоапаратів високої роздільної здатності, комп'ютерної та мультимедійної техніки, відповідного програмного забезпечення для аналізу електронних зображень; розробити технологічну схему і конструкцію обладнання для цифрової мікрофотографії капілярів біляногтьового валика верхніх кінцівок людини; запропонувати програмне забезпечення для реєстрації й аналізу цифрових мікро фото зображень капіляроскопії; за допомогою технологій та обладнання провести експериментальні дослідження структури та властивостей капілярів. Серед неінвазивних методик дослідження судинної системи на сьогоднішній день панують магнітно-резонансна томографія в ангиорежимі, ультразвукове ангиосканування і доплерографія, офтальмоскопія і капіляроскопія. Магнітно-резонансна томографія дозволяє оцінювати як анатомічні, так і функціональні особливості кровотоку. МРА ґрунтується на відмінності сигналу рухомої тканини (крові) від сигналу навколишніх нерухомих тканин, що дозволяє отримувати зображення судин без застосування будь-яких рентгеноконтрастних засобів. Ультразвукове дослідження поєднує в собі доплерографію та звичайне ультразвукове дослідження, що дозволяє лікарям побачити структуру кровеносних судин. При традиційному ультразвуковому дослідженні застосовуються ультразвукові хвилі, нечутні людським вухом, які відбиваються від кровеносних судин. Доплерівський ультразвук може вимірювати швидкість, з якою звукові хвилі відбиваються від рухомого елемента. Офтальмоскопія входить у стандартний огляд лікаря-офтальмолога та є одним із найважливіших методів діагностики захворювань очей. саме при цьому дослідженні можна візуально оцінити стан судин людини. А також допомагає діагностувати аутоімунні захворювання. Капіляроскопія дає можливість виконати повномасштабне дослідження мікроциркуляції організму (у випадку генералізованих порушень) та регіональних порушень мікроциркуляції, а також охарактеризувати метаболізм у тканинах. Порушення функціонування капілярів сприяє порушенню кровообігу, який викликає застій крові, порушення обмінних процесів, слідством якого є зниження імунітету, загострення хронічних і розвиток нових захворювань. Оптична комп'ютерна капіляроскопія – це неінвазивний метод візуалізації, дослідження та збереження зображення капілярів, що дає можливість зробити висновки про стан мікроциркуляції крові. Експериментальне підтвердження роботи оптимізованого програмно-апаратного комплексу капіляроскопії було проведено на дослідженні капілярів нігтьового ложа людини хворої на цукровий діабет II-типу з терміном хвороби 10 років, що знаходиться на інсуліновій терапії. Проведений аналіз методів досліджень мікроциркуляції крові людини показав необхідність оптимізації і удосконалення методу оптичної капіляроскопії за допомогою застосування матриць фотоапаратів високої роздільної здатності з одночасною обробкою зображень сучасними комп'ютерними засобами

Ключові слова: мікроциркуляція, алгоритм, графіки, судинна система, методи, дослідження, ангиосканування, офтальмоскопія, апаратно-програмний комплекс.

Вступ

Цей напрям досліджень дав поштовх до виникнення такої науки як ангиології, в якій розглядається регіональна ангиоархітектоніка, структура й функції судинної системи людського організму, його кровопостачання та кровообіг в різних станах. Відтепер проблема діагностики порушень структури та функціонування судинної системи набуває великого науково-практичного значення, оскільки сучасні діагностичні системи дають змогу по-новому – в динаміці, а не в статичній візуалізувати функції тих чи інших судин, провести прижиттєве неінвазивне моделювання виявлених патологічних станів у живому органі-

змі, зумовлених експериментально модельованими дизгеміями, індивідуально визначити фактори ризику й прогнозувати перебіг судинної патології. Індивідуальний підхід у діагностиці порушень кровообігу дає можливість оптимізувати подальший план лікування [1].

Дослідження судинної системи людського організму завжди звертало увагу лікарів. Починаючи з сучасної медицини, взаємне функціонування всіх ланок єдиного процесу систем кровообігу аналітично узагальнюється для визначення серця та/або венозної системи як основної ланки забезпечення кровотоку.

Система мікроциркуляції — одна з найважливіших систем, стан яких дає можливість виявля-

ти хвороби на ранніх стадіях. Оскільки капілярне кровопостачання здійснює основну функцію мікроциркуляторної системи – транскапілярний обмін, тобто обмін речовин між кров'ю і тканинами. Стан мікроциркуляції може слугувати арбітром благополуччя системної гемодинаміки та відображенням збереженої артеріовенозної рівноваги в регіональних судинних басейнах. Тому погляди науковців та експертів знову звернулися до стану мікроциркуляторного русла. На сучасному етапі розвитку візуалізаційних технологій *in vivo* закономірний ренесанс давно забутої капіляроскопії [2,3].

Мета роботи

Аналіз існуючих методів дослідження мікроциркуляції крові та удосконалення технології капіляроскопії, технічних засобів растрової мікрофотографії для визначення фізіологічного стану, порушень і патологій капілярного кровообігу.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих неінвазивних методів дослідження судинної системи людини;
- вдосконалити метод оптичної капіляроскопії за допомогою застосування сучасних цифрових фотоапаратів високої роздільної здатності, комп'ютерної та мультимедійної техніки, відповідного програмного забезпечення для аналізу електронних зображень;
- розробити технологічну схему і конструкцію обладнання для цифрової мікрофотографії капілярів біляногтьового валика верхніх кінцівок людини;
- запропонувати програмне забезпечення для реєстрації й аналізу цифрових мікро фото зображень капіляроскопії;
- за допомогою технологій та обладнання провести експериментальні дослідження структури та властивостей капілярів.

Основна частина

Серед неінвазивних методик дослідження судинної системи на сьогоднішній день панують магнітно-резонансна томографія в ангіорежимі, ультразвукове ангіосканування та доплерографія, офтальмоскопія і капіляроскопія [4].

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) допомагає підтвердити розташування, діаметр та контур гілок дуги аорти головного мозку, зовнішньої сонної артерії, внутрішньої сонної артерії, хребетної артерії, вен та синусів мозку. Також оцінює загальний функціональний стан судинної мережі, тобто напрямок і швидкість кровотоку, й візуалізує патологічні зміни в структурі різних ділянок судинної системи [4,5]. У багатьох випадках цей аналіз використовується для ранньої діагностики ішемічних уражень головного мозку та динамічної оцінки початку інсульту. Важливою відмінністю МРТ судин головного мозку є можливість візуалізації артеріальних та венозних судин без використання контрастних речовин.

На сьогоднішній день існує кілька методів МРТ для дослідження нервово-судинної системи. Ці методи включають модифікацію звичайної МРТ для візуалізації судин, а також магнітно-резонансну ангіографію, яка дозволяє спостерігати тік крові.

Магнітно-резонансна томографія в ангіорежимі (МРА) — метод отримання зображення кровонесних судин за допомогою магнітно-резонансного томографа. Дослідження проводиться на томографах з величиною індукції магнітного поля не менш ніж 0,3 Тл. Метод дозволяє оцінювати як анатомічні, так й функціональні особливості кровотоку. МРА ґрунтується на відмінності сигналу рухомої тканини (крові) від сигналу навколишніх нерухомих тканин, що дозволяє отримувати зображення судин без застосування будь-яких рентгеноконтрастних засобів. Для отримання більш чіткого зображення застосовують особливі контрастні речовини на основі парамагнетиків (гадоліній). Головний недолік МРА застосування високо вартісного стаціонарного обладнання [5].

Ультразвукове ангіосканування та доплерографія. Дуплексне ультразвукове дослідження поєднує в собі доплерографію та звичайне ультразвукове дослідження, що дозволяє лікарям побачити структуру кровонесних судин. Дуплексне сканування показує рух крові по судинах і дозволяє вимірювати швидкість кровотоку. Цей метод також дозволяє визначити діаметр судин і виявити їх закупорку. При традиційному ультразвуковому дослідженні застосовуються ультразвукові хвилі, нечутні людським вухом, які відбиваються від кровонесних судин. Комп'ютер далі перетворює їх в двомірне чорно-біле зображення. Доплерівський ультразвук може вимірювати швидкість, з якою звукові хвилі відбиваються від рухомого елемента. Ультразвуковий промінь потрапляє на еритроцити крові та відбивається від них, а швидкість ультразвуку залежить від швидкості руху еритроцитів. На основі доплерівського дослідження формується двовимірне зображення, яке показує, чи це перешкода кровотоку у вигляді звуження судин атероматозними бляшками. При дуплексному скануванні використовуються два типи ультразвукового дослідження разом. Звичайне ультразвукове дослідження показує структуру кровонесних судин, в той час як доплерівське дослідження показує рух крові по судинах. Дуплексне дослідження надають зображення, яке може бути кольоровим, що вказує лікарю місце порушення кровотоку, а також на його швидкість та напрям.

Дуплексне сканування застосовується в діагностиці наступних захворювань:

- окклюзовано-стенотичне захворювання сонних артерій;
- захворювання судин нижніх кінцівок;
- захворювання судин верхніх кінцівок;
- варикозне розширення вен нижніх кінцівок;
- аневризми черевного та грудного відділів аорти.

Ускладнень або побічних ефектів після дуплексного сканування немає. Дуплексне ультразвукове дослідження передбачає використання високочастотних звукових хвиль для визначення швидкості кровотоку та структури вен ніг. Термін «дуплекс» відноситься до того факту, що використовуються два режими ультразвуку: доплерівський і В-режим. Перетворювач В-режиму (як мікрофон) отримує зображення судини, що вивчається. Допплерівський зонд у датчику оцінює швидкість і напрямок кровотоку в судині. Наприклад, дуплексне сканування сонних артерій може бути виконано для оцінки закупорки або звуження сонних артерій шиї та/або гілок сонної артерії. Цей вид доплерівського дослідження надає двовимірне (2-D) зображення артерії, за яким можна визначити ступінь кровотоку, а також структуру артерії та місце оклюзії [5,6].

Існують різні види дуплексних ультразвукових досліджень. Деякі з них включають:

- артеріальне та венозне дуплексне УЗД живота. Цей тест досліджує кровоносні судини та кровообіг черевної ділянки;
- дуплексне УЗД сонної артерії обстежує сонну артерію на шиї;
- дуплексне УЗД кінцівок дивиться на руки або ноги;
- дуплексне УЗД нирок досліджує нирки та їх судини;

Фундоскопія-огляд очного дна за допомогою окулярів. При офтальмоскопії простим (дзеркальним) офтальмоскопом необхідне джерело світла, яке розташовують зазвичай зліва від досліджуваного. Електрооптичні офтальмоскопії мають систему підсвічування, які не потребують додаткового джерела світла. Дослідження проводиться в темній кімнаті. Розрізняють офтальмоскопія в прямому та зворотному вигляді. При прямій фундоскопії очне дно спостерігається безпосередньо через заломлючі середовища досліджуваного ока шляхом наближення дзеркала до ока. Дзеркало розміщують на відстані приблизно 50 см від досліджуваного ока, а лупу – на відстані 7а від досліджуваного ока. У цьому випадку між лупою та досліджуваним оком отримують протилежне зображення очного дна. Очне дно збільшується в 5 разів за допомогою реверсивних окулярів та в 16 разів за допомогою прямих окулярів. Таким чином, реверсивна офтальмоскопія використовується для огляду очного дна в цілому, тоді як не реверсивна офтальмоскопія використовується для огляду окремих ділянок очного дна[7]. Існують прості (дзеркальні) офтальмоскопи, які можна використовувати тільки із зовнішнім джерелом світла, й електрооптичні офтальмоскопи з власною системою освітлення. Обидва типи приладів можуть бути забезпечені рухомими дисками або стрічками з набором коригуючих лінз (рефракційні офтальмоскопи). Розрізняють також ручні (портативні) й стаціонарні (великі) офтальмоскопи. Сучасні електричні офтальмоскопи, як правило,

є безрефлексними, тобто дозволяють проводити офтальмоскопію в умовах максимального усунення світлових рефлексів з оптичних поверхонь приладу і з поверхні рогівки. В основу безрефлексної офтальмоскопії покладено принцип відокремлення пучка світла, що висвітлює очне дно, від пучка світла, відбитого від досліджуваного очного дна, яке потрапляє в око спостерігача. Сучасні офтальмоскопи як портативні, так й стаціонарні, обладнані системами фіксації та передачі зображення на комп'ютер [8,9].

Офтальмоскопія входить у стандартний огляд лікаря-офтальмолога та є одним із найважливіших методів діагностики захворювань очей. Крім очних захворювань, офтальмоскопія допомагає у діагностиці таких патологій, як дисемінована кандидемія, цитомегаловірус у ВІЛ-інфікованого пацієнта, а також визначення стадії діабету, гіпертонії та багатьох інших, оскільки саме при цьому дослідженні можна візуально оцінити стан судин людини. А також допомагає діагностувати аутоімунні захворювання, наприклад, синдром Шегрена. Головним недоліком офтальмоскопії є неможливість дослідження кровотоку в інших дрібних судинах, окрім судин ока.

Капіляроскопія як не інвазивний метод діагностики мікроциркуляції в нігтьових ложах пальців рук і ніг відома з 1950-х років, коли стрімко розвивалася технологія оптичної мікроскопії. При цьому основним методом отримання зображень капілярів був мікроскоп, адаптований до дослідження нігтьових валиків, а саме: оптичний капіляроскоп зі спеціальним підсвічуванням пальця зверху, який міг освітлювати ділянку шкіри нігтьового валика. Аналогова модель оптичного капіляроскопа дозволяла збільшувати зображення в 30 разів[5,6]. Капіляроскопія дає можливість виконати повномасштабне дослідження мікроциркуляції організму, у випадку генералізованих порушень та регіональних порушень мікроциркуляції, а також охарактеризувати метаболізм у тканинах. Капіляроскопічна картина є індикатором роботи цілісної судинної системи в різних сегментах: серце – артерії – капіляри – вени – серце. Патологія капілярів супутня будь якому захворюванню. Порушення функціонування капілярів сприяє порушенню кровообігу, який викликає застій крові, порушення обмінних процесів, внаслідок чого є зниження імунітету, загострення хронічних і розвиток нових захворювань.

Напрямки застосування капіляроскопії в медицині наступні [2,6].

В неврології: хвороба Рейно, ангіотрофоневроз, розсіяний склероз, остеохондроз, судомний синдром, епілепсія, порушення мозкового кровообігу, гіпоталамічний та дієнцефальний синдроми, головний біль, запаморочення, залишкові явища після нейроінфекцій, синдром хронічної втоми, атеросклероз, церебральна ангіодистонія.

Кардіології: гіпертонічна хвороба, порушення

ритму серця, вроджені та набуті вади клапанного апарату серця, судинні дистонії, ішемічна хвороба серця, атеросклероз.

Педіатрія: вегето-судиннадистонія, головний біль, швидка розумова втома, виснаження, інфантильність, артеріальна гіпотензія, гіпертензія.

Ендокринології: діабетична ангіопатія, діенцефальний синдром, патологія щитоподібної залози, клімактеричний синдром.

В психіатрії: церебрастенія, гіпердинамічні синдроми, неврозоподібний і астеноневротичний синдроми, дитячі страхи та фобії, емоційна лабільність.

В акушерстві: токсикоз вагітності, синкопальні стани, запаморочення, вивчення стану мозкового кровопостачання вагітної для вибору тактики ведення пологів.

В спортивній медицині: об'єктивізація геодинамічних змін при дозованих фізичних навантаженнях.

В профілактичних оглядах залізничників, льотчиків та людей інших професій, пов'язаних із фактором підвищеного ризику.

Оптична комп'ютерна капіляроскопія – це неінвазивний метод візуалізації, дослідження та збереження зображення капілярів, що дає можливість зробити висновки про стан мікроциркуляції крові. Результатом обстеження є отримання статичного або динамічного зображення кровотоку у даних судинах на екрані персонального комп'ютера, обробка та архівування даних, виявлення та оцінка морфологічних та структурних змін мікроциркуляції в цілому.

Виконавши аналіз методів дослідження мікроциркуляції крові в якості удосконалення вибрано капіляроскопію, яка може бути реалізована на базі звичайних оптичних мікроскопів і цифрових камер загального вжитку. Врахувавши, що за останнє десятиліття роздільна здатність циф-

рових камер збільшилась у 103 разів, що складає: для непрофесійних камер 18-128 мрх/D", професійних – 32-1024 мрх/D", є доцільним їх застосування для оптичної капіляроскопії. Камери певних брендів, наприклад Canon, Nikon, Sony можливо використовувати на будь-яких мікроскопах, у тому числі й радянських зразків, які є високоякісними та доступними в бюджетному ціновому сегменті. Провівши модернізацію оптичних систем, обладнавши їх відповідною технікою реєстрації та системами візуалізації й обробки зображень, можна вийти на якісно новий рівень досліджень в галузі діагностики кровотоку в капілярах нігтьового ложа. Розроблено удосконалену структурну схему реалізації методу оптичної растрової капіляроскопії (рис. 1).

Реалізація методу починається з розміщення руки людини у полі зору об'єктиву мікроскопа, який фокусує зображення, передаючи його на фотоапарат, який проводиться зйомку об'єкту в режимі фотографування або відеозйомки. За допомогою відповідного інтерфейсу фотоапарат зв'язаний з комп'ютером і телевізором. Комп'ютер забезпечений прямим і зворотнім зв'язком. З метою запобігання вібрацій, що негативно впливає на якість зображення, керування фотоапаратом проводиться віддалено за допомогою програмного забезпечення, встановленого на комп'ютері. У режимі реального часу на екранах комп'ютера та телевізора спостерігається досліджуваний об'єкт. Процес передачі зображення з фотоапарату на комп'ютер з наступною його обробкою та дослідженням може проводитись online.

Конструкторську схему апаратно-програмного комплексу фотографування та відео фіксації мікрозображень різних об'єктів, який може бути застосований для дослідження мікроциркуляції крові в капілярах людини, реалізовано на (рис. 2).



Рис. 1. Структурна схема реалізації методу капіляроскопії

Джерело: авторська розробка

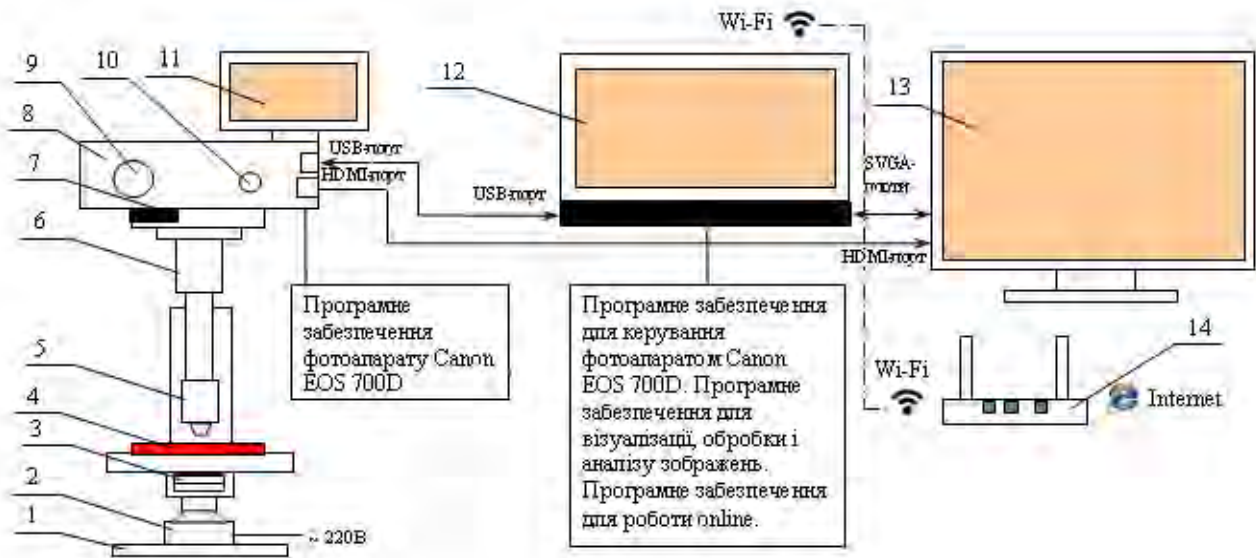


Рис. 2. Фотографування мікрозображень капілярів нігтьового ложа людини:

1 – мікроскоп «Біолам – М» (АУ – 21, МБИ – 9); 2 – освітлювач (лампа LED BIOM 5W); 3 – система фокусування освітлення мікроскопу; 4 – об’єкт, що досліджується; 5 – об’єктив мікроскопа; 6 – Т-адаптер 1; 7 – байонет-адаптер (перехідне кільце) M42 Canon EOS чип – III; 8 – фотоапарат Canon EOS 700D; 9 – перемикач режимів фотоапарату; 10 – кнопка затвору; 11 – дисплей фотоапарату; 12 – комп’ютер; 13 – телевізор; 14 – Wi-Fi-роутер.



Рис. 3. Апаратно-програмний комплекс фотографування мікро зображень капілярів нігтьового ложа людини

Зовнішній вигляд апаратно-програмного комплексу фотографування мікро зображень капілярів нігтьового ложа людини представлено на рис. 3.

Робота комплексу реалізується наступним чином: на предметному столі мікроскопа (1) розташовується об’єкт, що досліджується (рука людини на схемі показана умовно) (4). Можна застосовувати наступні мікроскопи «Біолам – М», АУ – 21, МБИ – 9 та ін. Головними вимогами до

мікроскопів є: довжина окулярної трубки – 85 мм; діаметр окулярної трубки – 25 мм; діаметр зовнішнього обода окуляра – 27,8 мм. Під предметним столом знаходяться системи фокусування світла (3). Освітлювачі (2) розташовуються як під предметним столом так і над ним. Освітлювачі дають можливість досліджувати об’єкти як в прохідному світлі (на просвічування), так і в відбитому. Система фокусування світла дозволяє змінювати інтенсивність і область освітлення. В

якості джерела світла використовується лампи LED BIOM 5W або аналоги за відповідними технічними характеристиками. Головною вимогою до лампи освітлювання є її температурний режим. Запропонована лампа в процесі роботи не нагрівається, тому не змінює температуру оточуючого середовища. Використання ламп, що нагріваються в процесі роботи, не допустиме, тому що нагрівання призводить до неконтрольованих деформацій лінз об'єктивів мікроскопа, що призводить до порушення фокусування системи. Якщо необхідно дослідити об'єкт у відбитому світлі, застосовується звичайний освітлювач, що також обладнується лампою типу LED, яка не нагрівається. Інтенсивність і область освітлення визначається потужністю лампи, відстанню до освітлювача, кількістю освітлювачів.

Встановлення матриці фотоапарату (8) на мікроскоп здійснюється за допомогою спеціально розробленої механічної системи кріплень (див. рис. 3), а також Т-адаптеру 1' (6) і байонету-адаптеру M42 Canon EOS чип – III (7). Механічна система дозволяє жорстко закріпити матрицю фотоапарату на окулярній трубці мікроскопа. Байонет-адаптер і Т-адаптер призначені для з'єднання окуляра мікроскопа з матрицею фотоапарату. Таке жорстке з'єднання реалізоване для усунення потрапляння зовнішнього світла на матрицю.

Байонет-адаптер можна використовувати двох типів. Перший тип не має вбудованої мікросхеми, не програмується, але матриця фотоапарату працює в автоматичному режимі з можливою незначною ручною налаштуванням. Другим типом є байонет-адаптер M42 Canon EOS чип – III, який обладнаний мікросхемою, що імітує наявність фірмового об'єктиву Canon. Це дає можливість змінювати будь-які налаштування камери з можливістю її програмування. Ручне керування дає можливість отримувати більш якісні та детальні знімки за рахунок збільшення світлочутливості матриці, налагодження глибини різкості, використання цифрових світлофільтрів та застосування багатьох програмованих стилів, ефектів і налаштувань.

Мікроскоп фокусується на досліджуваному об'єкті в ручному режимі з одночасною візуалізацією на моніторі комп'ютера (12) і телевізорі (13). Всі інші керування камерою проводяться віддалено за допомогою комп'ютера, з'єданого з фотоапаратом за допомогою інтерфейсу USB і відповідного програмного забезпечення. При роботі матриці фотоапарату з мікроскопом необхідно, по-можливості, уникати будь-яких зовнішніх впливів. Особливо це актуально при високих збільшеннях (600×; 1350×). Віддалене керування фотоапаратом необхідне для усунення будь-яких вібрацій в процесі налаштування і зйомки.

Зйомку можна проводити без комп'ютера використовуючи перемикач режимів (9), кнопку затвору (10) і дисплей фотоапарату (11). За такої

зйомки якість знімків знижується внаслідок вібрацій, внесених людським фактором при налаштуваннях і роботі затвору. Тому ручне керування варто використовувати лише в граничних випадках і при збільшеннях до 400×, в інших випадках краще використовувати пульт дистанційного керування роботою затвору камери.

Одержані знімки можуть бути передані через мережу Інтернет з використанням Wi-Fi-роутеру (14), зокрема, у деяких моделях фотоапаратів (CANON EOS 6D MKII Body) є вбудований Wi-Fi-передавач, що дозволяє безпосередньо надіслати знімки через мережу Інтернет.

В якості програмного забезпечення для візуалізації мікрооб'єктів і їх зйомки використані наступні програми: EOS Utility, ImageBrowser EX 1.1, Picture Style Editor 1.13, Digital Photo Professional 3.13, PhotoStitch 3.1. Ці утиліти фотоапарату дозволяють реалізовувати віддалену візуалізацію та зйомку, а також передачу та попередню обробку одержаних зображень [10].

Утиліта EOS Utility надає весь набір функцій, які потрібні для обміну інформацією між комп'ютером і камерою. Для камер EOS Digital можлива дистанційна візуалізація в режимі реального часу і зйомка, керована через комп'ютер. Така функція забезпечується датчиком дистанційного керування, який встановлений в камері. Всі параметри фотоапарату миттєво відображаються на комп'ютері. У будь-який момент можливе коригування витримки, діафрагми, балансу білого та ін. Виконуючи знімки в форматі RAW, можливо завантажувати їх в редактор безпосередньо з камери. Зображення JPEG так само можна відправляти безпосередньо в програму для обробки. Дана утиліта працює на Windows та на MAC.

Програма управління зображеннями ImageBrowser EX забезпечує зручність виконання всіх операцій, починаючи від завантаження, систематизації та редагування зображень, і закінчуючи друком або відправкою зображень по електронній пошті у вигляді вкладень. Програма PhotoStitch є частиною ImageBrowser EX. Вона дозволяє вибрати кілька знімків об'єкту та об'єднати їх, створивши панорамне зображення.

Програмне забезпечення IPicture Style Editor дозволяє створювати власні файли стилю зображення, щоб отримати знімки. Ці стилі можна застосовувати до зображень на етапі обробки файлів RAW або після завантаження в камеру застосовувати під час зйомки.

Високопродуктивне програмне забезпечення Digital Photo Professional для цифрових камер EOS і PowerShot (підтримують формат RAW), що дозволяє обробляти, переглядати і редагувати зображення RAW. За допомогою Digital Photo Professional можна легко виконувати базове і розширене редагування, а також друк зображень RAW. Дозволяє виконувати функції редагування: поворот зображення, налаштування балансу білого, регулювання динамічного діапа-

зону, регулювання кольору та точне налаштування характеристик колірної кривої. Digital Photo Professional підтримує sRGB, Adobe RGB, Wide Gamut RGB і Colour Management System (CMS), використовуючи профіль Міжнародного консорціуму за кольором (ICC).

Аналіз і обробка зображень на комп'ютері виконується за допомогою програми Adobe Photoshop CS6 [11]. Це потужний професійний графічний редактор використовується дизайнерами, художниками, розробниками текстур 3D-графіки. Він дозволяє реалізовувати наступні функції при аналізі й обробці зображень: 1) робота з кожним шаром окремо, створення груп шарів, прикріплення до них масок та інших елементів; 2) накладення фільтрів, розмиття, стилів, шуму в реальному часі; 3) зміна непрозорості та режиму шарів; 4) велика кількість автофігур, ліній, стрілок, здатність їх створення; 5) автоматичне та ручне виділення за допомогою різних ін-

струментів; 6) індивідуальна сортування шарів; 7) аналіз і редагування RGB-каналів зображення; 8) інструмент обробки файлів у форматі Raw Camera; 9) можливість ретушування, корекції кольору, автофокусування, масштабування, обертання, трансформації графіки та багато інших функцій.

Особливо цінною функцією при дослідженні й аналізі кровотоку в капілярах нігтьового ложа є можливість аналізу графіків RGB і CMYK-каналів, що виступають цифровою моделлю відповідного зображення. Експериментальне підтвердження роботи оптимізованого програмно-апаратного комплексу капіляроскопії було проведено на дослідженні капілярів нігтьового ложа людини хворої на цукровий діабет II-типу з терміном хвороби 10 років, що знаходиться на інсуліновій терапії. Проведено зйомку з оптичним збільшенням в $600\times$ (рис. 4) і за допомогою цифрового збільшення в $1200\times$ (рис. 5).



Рис. 4. Фото капілярів нігтьового ложа людини хворої на цукровий діабет в відбитому світлі із збільшенням в $600\times$.



Рис. 5. Фото капілярів нігтьового ложа людини хворої на цукровий діабет в відбитому світлі із цифровим збільшенням в $1200\times$.



Рис. 6. Фото капілярів нігтьового ложа людини хворої на цукровий діабет в відбитому світлі із збільшенням в $600\times$ після обробки графічним редактором Adobe Photoshop CS6.

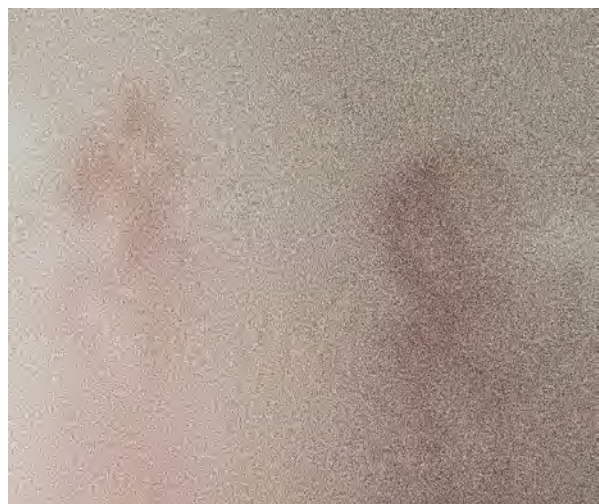


Рис. 7. Фото капілярів нігтьового ложа людини хворої на цукровий діабет в відбитому світлі із цифровим збільшенням в $1200\times$ після обробки графічним редактором Adobe Photoshop CS6.

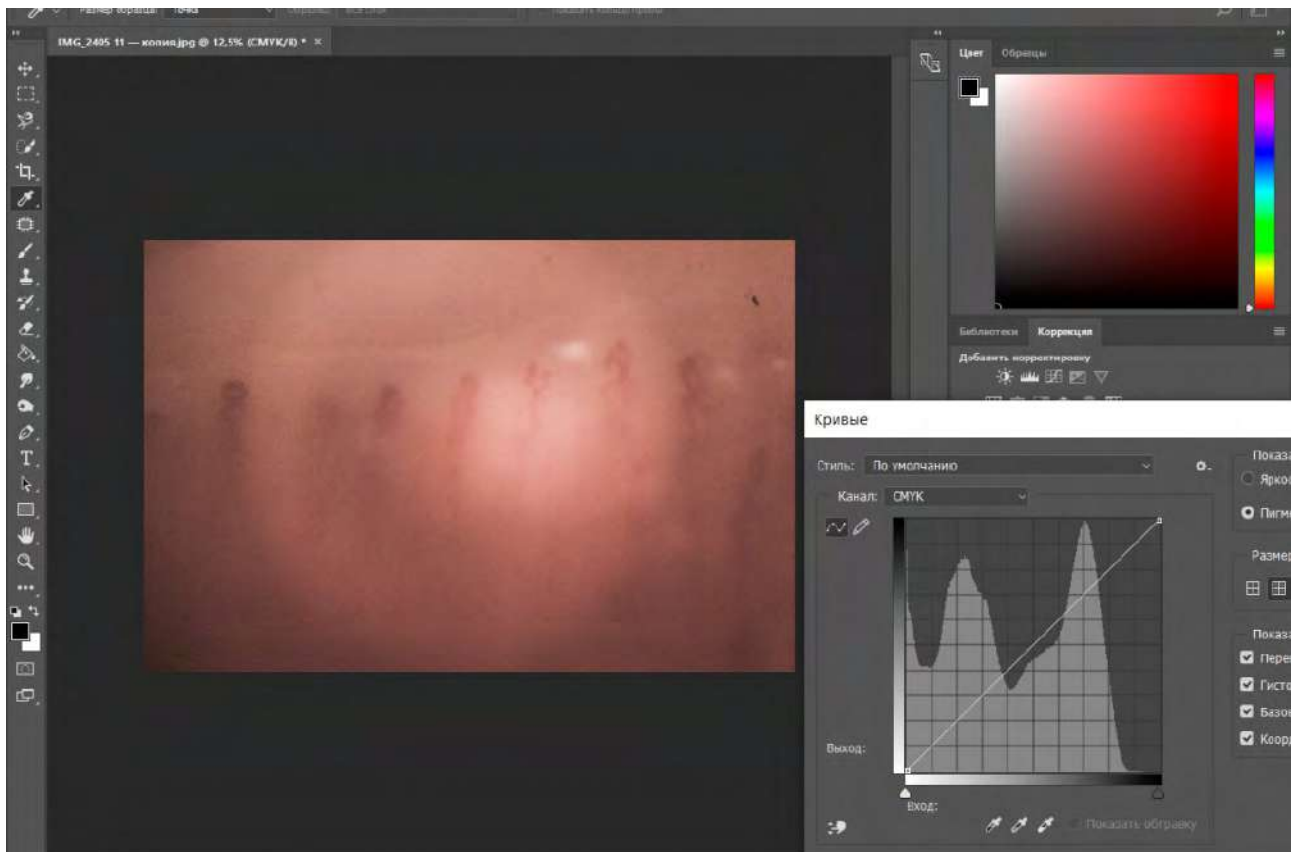
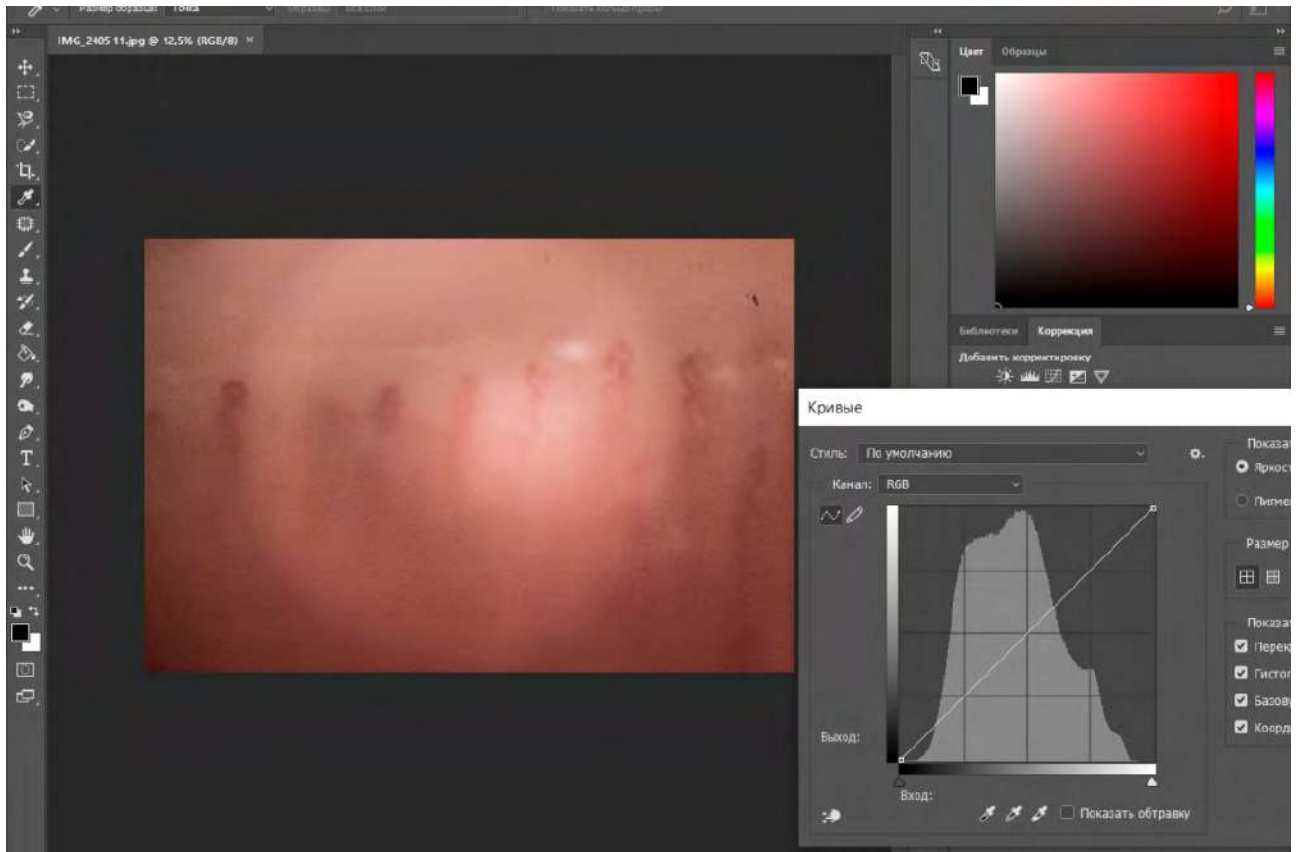


Рис. 8. Фото капілярів при збільшенні 600^x, та його аналіз за допомогою графіків кольорових моделей RGB і CMYK

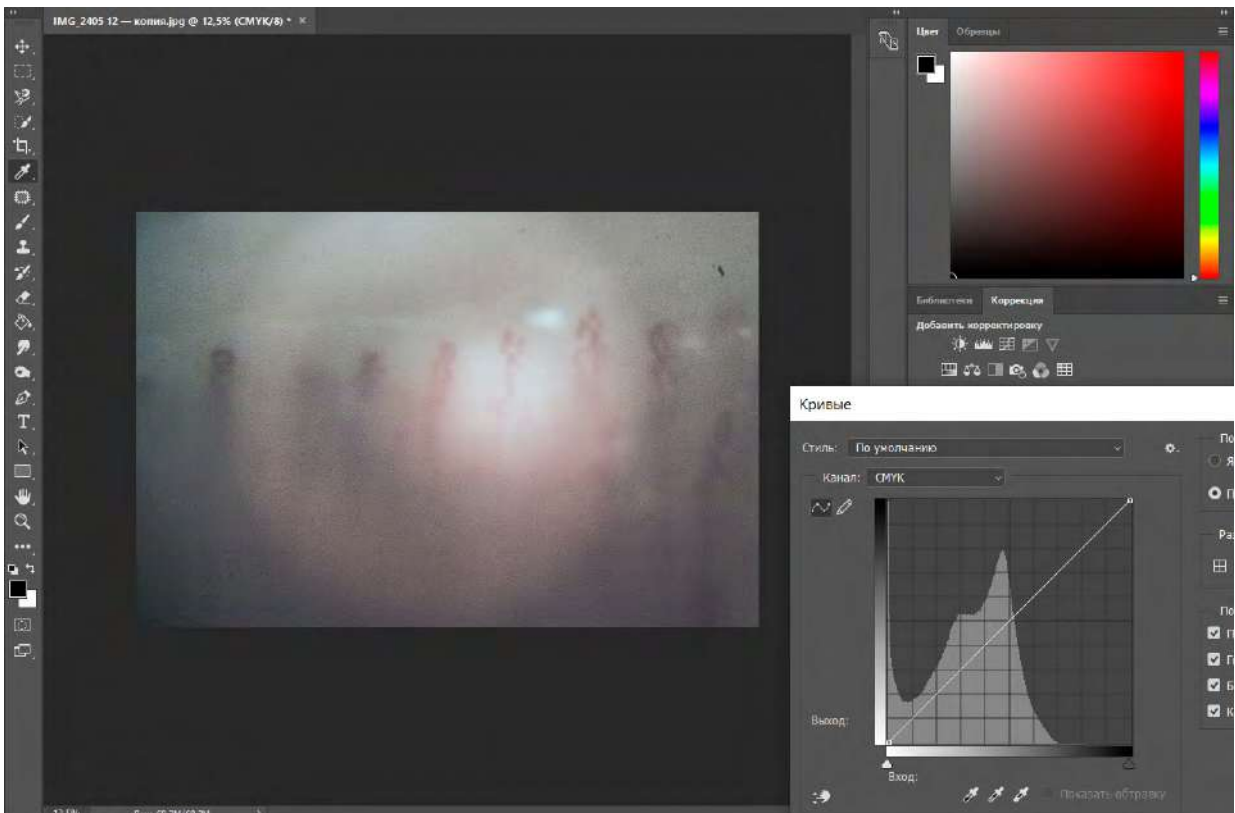
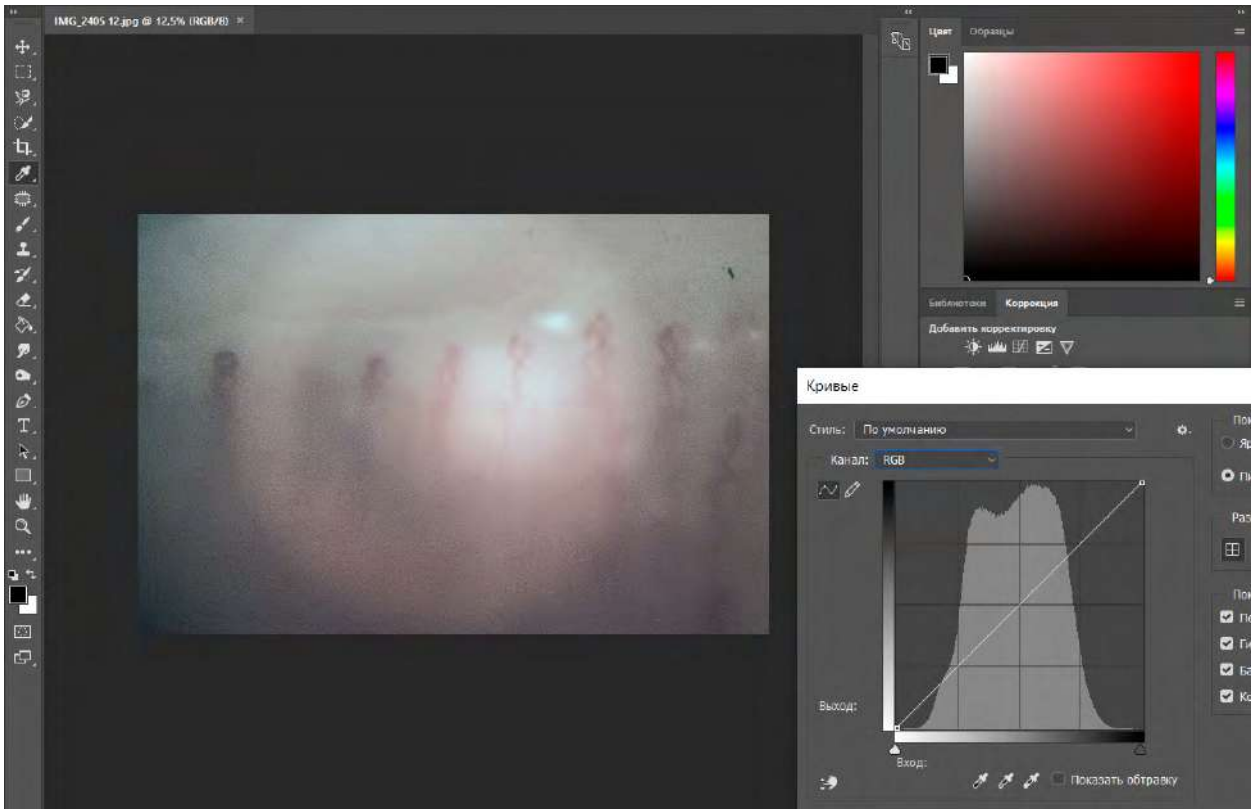


Рис. 9. Фото капілярів при збільшенні 600^x, покращене засобами графічного редактора Adobe Photoshop CS6 та його аналіз за допомогою графіків кольорових моделей RGB і CMYK

З метою покращення зображення проведено корекцію кольору, чіткості, яскравості і насиченості засобами графічного редактора Adobe Photoshop CS6 відповідно при збільшенні в 600× (рис. 6) і за допомогою цифрового збільшення в 1200× (рис. 7).

З метою ідентифікації, цифрової обробки та побудов відповідних цифрових зображень в моделях RGB і CMYK, фото капілярів при збільшенні 600× і оброблені за допомогою програми Adobe Photoshop CS6 (рис. 8,9).

Графіки, які одержано при обробці приведених для прикладу фото, є цифровим підписом відповідного зображення, які можуть бути використані при аналізі та діагностиці різних захворювань, як безпосередньо лікарем, так й за до-

помогою цифрових систем аналізу на основі штучного інтелекту. Використання штучного інтелекту є пріоритетним при аналізі та діагностиці, бо виключає помилки пов'язані з недосконалістю відображення зображень на моніторах і людський фактор. Для застосування штучного інтелекту необхідно створення бази цифрових зображень капілярів, яка включає зображення капілярів здорових людей з урахуванням віку та антропометричних особливостей, а також хворих людей з відповідними змінами в капілярах залежно від діагнозу. Алгоритм реалізації цифрового аналізу зображень, з урахуванням бази даних і використання штучного інтелекту, можна представити у вигляді функціональної блок-схеми (рис. 10).

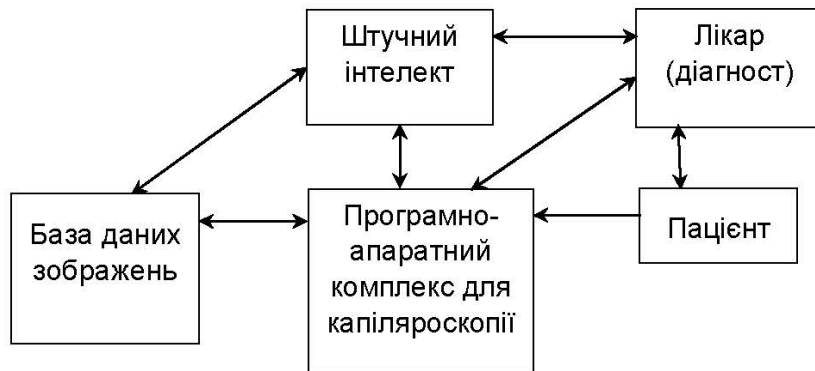


Рис. 10. Функціональна блок-схема діагностування стану капілярів на основі штучного інтелекту.

Висновки

Отже, проведений аналіз методів досліджень мікроциркуляції крові людини показав необхідність оптимізації та удосконалення методу оптичної капіляроскопії за допомогою застосування матриць фотоапаратів високої роздільної здатності з одночасною обробкою зображень сучасними комп'ютерними засобами. Розроблено технологічну та конструктивну схеми, побудовано програмно-апаратний комплекс для капіляроскопії нігтьового ложа людини, який дозволяє проводити фотографування відео зйомку й аналіз зображень в прохідному та відбитому світлі при оптичному збільшенні 600×, цифровому збільшенні 1200×, роздільною здатністю 18 мрх/D" з одночасною передачею зображень на комп'ютер і через мережу Інтернет. Використане програмне забезпечення аналізує, обробляє та зберігає зображення, а також будує кольорову модель в форматах RGB і CMYK, які є цифровим підписом відповідного діагностичного зображення, що пропонується використовувати для встановлення діагнозу з використанням бази даних і штучного інтелекту.

Особистий внесок авторів

Петровський О.М. - а) концепція та дизайн; б) адміністративна підтримка; в) надання матеріалів для дослідження; г) остаточне затвердження рукопису.

Соловійов В.В. - а) концепція та дизайн; б) адміністративна підтримка; в) редагування рукопису; г) остаточне затвердження рукопису.

Соловійова Н.В. - а) збір та узагальнення даних; б) аналіз та інтерпретація результатів; в) написання рукопису; г) редагування рукопису.

Мищенко А.В. - а) збір та узагальнення даних; б) аналіз та інтерпретація результатів; в) редагування рукопису.

Заколюдна О.Е. - а) збір та узагальнення даних; б) аналіз та інтерпретація результатів; в) редагування рукопису.

Кузнецова Т.Ю. - а) збір та узагальнення даних; б) аналіз та інтерпретація результатів; в) редагування рукопису.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Reference

1. Kuzmychev AYа, editor. Principy klinicheskoy kapillyaroskopii: monografiya [Principles of clinical capillaroscopy: a monograph]. Kiev; 1965. 170 p. (Russian).
2. Kozlov VI. Kapillyaroskopiya v klinicheskoy praktike [Capillaroscopy in clinical practice]. M: Prakticheskaia Medytyna; 2005. 232 p. (Russian).
3. Lushchik UB, Novytskyi VV, Kolosova YuO. Suchasni mozhyvosti kapillyaroskopii [Modern capabilities of capillaroscopy]. Kyiv: Kyiv Scientific and Methodological Centre for Ultrasound Medical Diagnostics "Istyna"; 2004. 36 p. (Ukrainian).
4. Pidtabachnyi AI, Klochko TR. Intehrovana systema vyznachennia porushen mikrotsyrkuliatsii krovi [Integrated system for detecting blood microcirculation disorders]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». 2016;(51):145–151. (Ukrainian).

5. Lushchik UB, Lushchik NG, Novytskyi VV, et al. Suchasni mozhlivosti tsilisnoi funktsionalnoi otsinky arteriovenoznoi rivnovahy v zamknutii sudynni systemi na makro- ta makrorivni [Modern possibilities of a holistic functional assessment of arteriovenous balance in a closed vascular system at the macro- and macro-level]. Kyiv; 2006. 120 p. (Ukrainian).
6. Avrunin OG. Opyit razrabotki biomeditsynskoy systemy tsifrovoy mikroskopii [Experience in developing a biomedical digital microscopy system]. Prikladnaya radioelektronika. 2009;8(1):46-52. (Russian).
7. Nosova YaV, Avrunin OG, Semenets VV. Biotekhnichna sistema dlia kompleksnoi olfaktometrychnoi diahnozyky [Biotechnical system for comprehensive olfactometric diagnostics]. Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnologii v promyslovishti. 2017;(1):64-68. (Ukrainian).
8. Atzeni F, Bardoni A, Cutolo M, Hunzelmann N, Krieg T, Martini G, et al. Localized and systemic forms of scleroderma in adults and children. Clin Exp Rheumatol. 2006 Jan-Feb;24(1 Suppl 40):36-45.
9. Piotto DG, Len CA, Hilário MO, Terrieri MT. Nailfold capillaroscopy in children and adolescents with rheumatic diseases. Rev Bras Reumatol. 2012 Oct;52(5):722-32.
10. Canon. Ohliad prohramnoho zabezpechennia Canon [Internet]. [cited 2023 Mar 30]. Available from: https://www.canon.ru/support/camera_software/
11. Adobe Photoshop CS6 [Internet]. [cited 2024 Apr 01]. Available from: <https://www.adobe.com/ru/products/photoshopfamily.html>

Summary

IMPROVEMENT OF CAPILLAROSCOPY METHOD FOR STUDYING HUMAN MICROCIRCULATION

Petrovskiy O.M., Soloviov V.V., Soloviova N.V., Mishchenko A.V., Zakolodna O.E., Kuznetsova T.Yu.

Key words: microcirculation, algorithm, graphs, circulatory system, methods, research, angioscanning, ophthalmoscopy, hardware and software complex.

The human circulatory system has historically captivated researchers in the field of medicine. Modern medicine, however, has moved beyond identifying a single crucial element, such as the heart or venous system, for maintaining blood flow. Instead, it emphasizes a more analytical approach, focusing on the interconnected functioning of all components within the system. The aim of this work is to analyze the existing methods of studying blood microcirculation and to improve the technology of capillaroscopy, technical means of raster microphotography to determine the physiological state and disorders of capillary circulation.

To achieve this objective, we address the following tasks: analyzing existing non-invasive methods for studying the human vascular system; enhancing the optical capillaroscopy method through the utilization of modern high-resolution digital cameras, computer, and multimedia equipment, along with appropriate software for analyzing electronic images; developing a technological scheme and equipment design for digital microphotography of capillaries in the periungual region of the upper extremities; providing software solutions for registering and analyzing digital microphotographic images obtained through capillaroscopy; conducting experimental studies to explore the structure and properties of capillaries utilizing the developed technologies and equipment.

Magnetic resonance imaging (MRI) enables the comprehensive evaluation of both anatomical and functional aspects of blood flow. Magnetic resonance angiography (MRA) capitalizes on the distinction between the signal emitted by moving tissue (blood) and that of surrounding stationary tissue, facilitating the acquisition of vascular images without the need for radiopaque contrast agents. Ultrasonography integrates Doppler and conventional ultrasound techniques, providing physicians with insights into blood vessel structure and blood flow dynamics. Traditional ultrasound employs sound waves that are imperceptible to the human ear and bounce off blood vessels, while Doppler ultrasound measures the velocity of sound wave reflection from moving elements. Ophthalmoscopy constitutes a fundamental component of standard ophthalmological examinations, serving as a pivotal tool for diagnosing eye conditions and evaluating the condition of blood vessels. Additionally, ophthalmoscopy aids in diagnosing autoimmune disorders. Capillaroscopy enables comprehensive assessments of both systemic and regional microcirculation disorders, facilitating the characterization of tissue metabolism. Dysfunction in capillary function contributes to circulatory impairments, leading to blood stasis, metabolic irregularities, and compromised immunity, thereby exacerbating existing conditions and predisposing individuals to new diseases. Optical computerized capillaroscopy offers a non-invasive means of visualizing, examining, and archiving capillary images, enabling clinicians to make informed assessments regarding blood microcirculation. Experimental validation of the optimized hardware and software capillaroscopy system was conducted using nail bed capillaries of a patient with type II diabetes mellitus undergoing insulin therapy for 10 years. This study underscores the importance of refining and enhancing optical capillaroscopy methodologies by leveraging high-resolution camera sensors and modern computational tools for image processing.