

12. Prasanth K., Paul B., Balakrishnan A. A. Fetal ECG Extraction Using Adaptive Filters. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2012. Vol. 2. № 4. Pp. 1483-1487.
13. Франчевська Г., Хвостівський М., Дозорський В. Застосування адаптивної фільтрації для виділення електрокардіосигналу плоду на фоні завад. *Актуальні проблеми сучасних технологій* : зб. тез доповідей XI Міжн. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів, м. Тернопіль, 7-8 грудня 2022 р. С. 172-173.
14. Франчевська Г. Комп'ютеризована система розпізнавання фетальної електрокардіограми: магістерська робота. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, 2020. 84 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/33262/1/Master_Thesis_Franchevska.pdf.

Стаття надійшла 22.11.2024

Стаття прийнята 05.12.2024

УДК 681.32

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321357

© Котик М.В.*

ДОСТУПНЕ ЛІКУВАННЯ ДІАБЕТУ: СТРАТЕГІЇ РОЗРОБКИ ЕКОНОМІЧНО ЕФЕКТИВНИХ НЕІНВАЗИВНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ГЛЮКОЗИ

У статті розглядається розробка оптичних неінвазивних методів для визначення рівня глюкози в крові у пацієнтів з діабетом. Основна мета дослідження полягає у вивченні різних методик вимірювання концентрації глюкози, включаючи традиційні техніки, такі як хімічний аналіз крові, яка забирається шляхом проколювання пальця або з вени на передпліччі, а також альтернативні неінвазивні підходи. Дослідження спрямоване на виявлення переваг неінвазивного моніторингу, які включають уникнення болю та ризиків, пов'язаних із використанням гострих предметів, можливість збільшення частоти тестів, що забезпечує більш жорсткий контроль за рівнем глюкози. Робота також зосереджена на описі потенційних комерційних переваг неінвазивних пристроїв для моніторингу глюкози. Методи дослідження включають оптичні технології та аналіз наукової літератури. Отримані результати включають розгляд можливостей створення неінвазивних оптоелектронних пристроїв та методик підвищення точності вимірювання кров'яних компонентів. Запропонована техніка та оптичний датчик можуть значно підвищити точність неінвазивного вимірювання кров'яних компонентів, враховуючи внутрішню структуру капілярів та стан шкіри. Рекомендується комбінувати цей метод з іншими визнаними методами неінвазивного визначення кров'яних компонентів *in vivo*, такими як глюкоза, білірубін та кисень, адже він сам по собі не може повністю вирішити проблему неінвазивного аналізу крові у діабетичних пацієнтів. Висновки дослідження підкреслюють значимість основних оптичних технологій для неінвазивного моніторингу глюкози та їх економічну ефективність у порівнянні з перевагами та недоліками.

Ключові слова: діабет, аутоімунне захворювання, глюкоза, неінвазивні методи, оптичні методи.

* канд. техн. наук, ст. викладач, Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, ORCID: 0000-0001-6149-0734, mykhaylo.kotyk@pnu.edu.ua

M. Kotyk. Affordable diabetes treatment: strategies for the development of cost-effective non-invasive glucose monitoring systems. The article examines the development of optical non-invasive methods for determining blood glucose levels in diabetic patients. The primary aim of the study is to explore various techniques for measuring glucose concentration, including traditional methods such as chemical blood analysis, obtained through finger pricks or venous sampling from the forearm, as well as alternative non-invasive approaches. The research focuses on identifying the advantages of non-invasive monitoring, which include avoiding pain and risks associated with sharp objects and enabling more frequent testing, thus ensuring tighter glucose control. The work also highlights the potential commercial benefits of non-invasive glucose monitoring devices. Research methods include optical technologies and a review of scientific literature. The results outline the feasibility of developing non-invasive optoelectronic devices and techniques to improve the accuracy of measuring blood components. The proposed technique and optical sensor are expected to significantly enhance the precision of non-invasive blood component measurements by considering the internal structure of capillaries and the condition of the skin. It is recommended to combine this method with other recognized non-invasive techniques for determining blood components in vivo, such as glucose, bilirubin, and oxygen, as this approach alone cannot fully address the challenges of non-invasive blood analysis in diabetic patients. The conclusions emphasize the significance of core optical technologies for non-invasive glucose monitoring and their cost-effectiveness compared to their advantages and limitations.

Keywords: diabetes, autoimmune disease, glucose, non-invasive methods, optical methods.

Постановка проблеми. Діабет – хронічне захворювання, від якого страждають мільйони людей у всьому світі. Цей процес відбувається, коли організм не може належним чином регулювати рівень цукру в крові, що призводить до підвищення рівня глюкози в крові. Розуміння причин та факторів ризику діабету має вирішальне значення для профілактики та лікування цього серйозного захворювання. Існує два основні типи діабету: тип 1 і тип 2. Діабет типу 1 – це аутоімунне захворювання, при якому імунна система організму атакує і руйнує клітини підшлункової залози, які виробляють інсулін. Це призводить до нестачі інсуліну – гормону, відповідального за регулювання рівня цукру в крові. Діабет 1 типу зазвичай діагностується у дітей та молодих людей, хоча він може розвинутися у будь-якому віці [1].

За статистикою у всьому світі близько 425 мільйонів хворих на цукровий діабет, і 67% з них – це пацієнти з Азії. Приблизно від діабету щорічно помирає приблизно 4 мільйони хворих (9% смертей у всьому світі). За прогнозами Міжнародної федерації діабету (IDF) до 2045 року таких хворих буде 629 мільйонів.

Діабет 2 типу зустрічається частіше і зазвичай розвивається у дорослих віком від 45 років, хоча його все частіше діагностують у молодших людей через зростання показників ожиріння. При діабеті 2 типу організм стає стійким до інсуліну, або не виробляє достатньо інсуліну для підтримки нормального рівня цукру в крові. Існує кілька факторів ризику, які можуть збільшити ймовірність розвитку діабету. До них відносяться:

- сімейний анамнез: наявність близького члена сім'ї з діабетом збільшує ризик розвитку цього захворювання;
- ожиріння. Надмірна вага або ожиріння значно підвищує ризик розвитку діабету 2 типу;
- сидячий спосіб життя. Відсутність фізичної активності може сприяти збільшенню ваги та збільшенню ризику розвитку діабету;
- нездорове харчування: вживання великої кількості солодких продуктів може призвести до збільшення ваги та резистентності до інсуліну;
- вік: ризик розвитку діабету 2 типу збільшується з віком, особливо після 45 років;
- етнічна приналежність: деякі етнічні групи, такі як афроамериканці, латиноамериканці, корінні американці та американці азіатського походження, мають більшу поширеність діабету.

Інші фактори, які можуть збільшити ризик розвитку діабету, включають високий кров'яний тиск, високий рівень холестерину, гестаційний діабет (діабет під час вагітності), синдром полікістозних яєчників та серцево-судинні захворювання в анамнезі. Слід зазначити, що, хоча деякі

фактори ризику розвитку діабету, такі як генетика та етнічна приналежність, знаходяться поза нашим контролем, багато факторів можна змінити, щоб знизити ризик [2].

Прогноз значення глюкози у крові проводять за допомогою глюкометра проколюванням пальця ланцетом (маленькою гострою голкою), нанесення краплі крові на тест-смужку та розміщення смужки в вимірнику, який відбиває ступінь глюкози в крові. Більшість сучасних методів самоконтролю рівня глюкози в крові є інвазивними, тобто для кожного тесту потрібно зразок крові, зазвичай одержуваний із кінчика пальця [3]. Дослідження на глюкозу крові (тестування пальцем) пов'язані з болем для пацієнта через страх перед гіпоглікемією, яка викликана суворим контролем значення глюкози. Ці вимірювання важко виконувати у хворих із тривалим діабетом через мозолі на пальцях.

Нещодавно було розроблено флеш-сенсорний моніторинг рівня глюкози, який дозволяє періодично, але часто вимірювати рівень глюкози, а також є мінімально інвазивним. Миттєвий моніторинг рівня глюкози може покращити контроль рівня глюкози і зменшити гіпоглікемію. Флеш-датчик глюкози FreeStyle Libre швидко здобув популярність серед пацієнтів завдяки простоті використання, невеликому розміру та нижчій вартості порівняно з конкурентами. Отже, неінвазивний метод вимірювання рівня глюкози у крові сприятиме значному збільшенню якості життя. В останні роки майже всі оптичні способи були вивчені для знаходження неінвазивного методу [4]. У цій статті основна увага приділяється опису та стратегії розробки економічно ефективних неінвазивних систем моніторингу рівня глюкози.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цифрові технології, що використовуються у сфері охорони здоров'я для автоматизації діагностичних процесів, включають телемедицину, машинне навчання, штучний інтелект, Інтернет речей (IoT) та хмарні технології. У дослідженні, присвяченому цифровізації охорони здоров'я та телекомунікаційних систем підтримки, розглядаються методи інтелектуальної підтримки складних тестових рішень для електронної медичної історії, які прискорюють порівняння даних пацієнтів та розвиток діагностичних гіпотез [5]. Машинне навчання використовується для автоматизації діагностичних процесів, наприклад, для прогнозування діабету з використанням таких параметрів, як вік, рівень глюкози та тиск [6]. Цифрові технології також сприяють просуванню персоналізованої охорони здоров'я, покращуючи управління пацієнтами та діагностику на основі даних про генетику, навколишнє середовище та спосіб життя пацієнта [7]. В епоху цифровізації використання IoT та хмарних технологій дозволяє автоматизувати обробку даних та надавати недорогі діагностичні рішення [8].

В останні роки в сфері сучасної медицини інтенсивно розробляються та впроваджуються оптикоелектронні неінвазивні методи моніторингу «in vivo», що дозволяють вимірювати концентрації важливих показників крові людини, зокрема кисень, глюкозу, холестерин та білірубін. Ці методи стають все більш популярними завдяки їх безболісності та відсутності необхідності фізичного втручання в організм, що особливо важливо при необхідності регулярних вимірювань. Актуальність та перспективність таких методів підтверджується в наукових роботах M.N. Larsen, M. Mohr та F. Lobelo [9], T. Iverson, H. Alfares, G.S. Nijjar та J. Wong [10], D.C. Lau та H. Teoh [11], а також X. Liu та J. Zhang [12], які також зазначають, що ці методи не вимагають додаткових реагентів чи складного обладнання для збору біологічних зразків.

Однак, за інформацією V.I. Malinovsky [13], головною проблемою оптикоелектронних неінвазивних методів є їх порівняно низька точність вимірювань. Наприклад, у випадку неінвазивних вимірювачів рівня глюкози точність може становити до 20%. Ця проблема є особливо актуальною і її також підтверджують у своїх дослідженнях A. Mishra, V. Verma, V. Bisht та J. Bala [14], які вказують на складності використання складних безконтактних оптичних механізмів для отримання точних даних про рівні компонентів крові. Ці механізми потребують ретельного врахування багатьох факторів, таких як відмінності в біологічних та структурних особливостях різних пацієнтів, що впливає на здатність точно вимірювати концентрації необхідних речовин в крові.

Таким чином, неінвазивні оптикоелектронні методи, попри їх значні переваги, все ще потребують подальших досліджень та вдосконалень для підвищення точності вимірювань та зменшення можливих похибок.

Метою статті є вивчення стратегії та міркування щодо розробки та виробництва економічно ефективних неінвазивних систем моніторингу рівня глюкози, зосереджуючись на виборі матеріалів, виробничих процесах і доступності ринку.

Виклад основного матеріалу. Технології, що використовуються для неінвазивного моніторингу глюкози, включають оптичні, трансдермальні та термічні методи. Оптичні методи використовують різні властивості світла для взаємодії з глюкозою, що залежить від її концентрації, і поділяються на:

1. *Інфрачервона спектроскопія (ІКС)* – цей метод заснований на використанні зовнішнього джерела світла в організмі з діапазоном довжини хвилі 750-2500 нм. Інфрачервона спектроскопія (ІКС) дозволяє вимірювати рівень глюкози в тканинах на глибині 1-100 міліметрів із зменшенням глибини проникнення для збільшення значення довжини хвилі. Світло, зосереджене на тілі, частково поглинається і розсіюється через його взаємодію з хімічними компонентами тканини (рис. 1). Тканина може піддаватися впливу змін концентрації глюкози через зміни в її поглинанні, що пов'язані з водотоннажністю, або через зміни у власному поглинанні. Зміни концентрації глюкози також впливають на інтенсивність світла, розсіяного тканиною (μ_s).

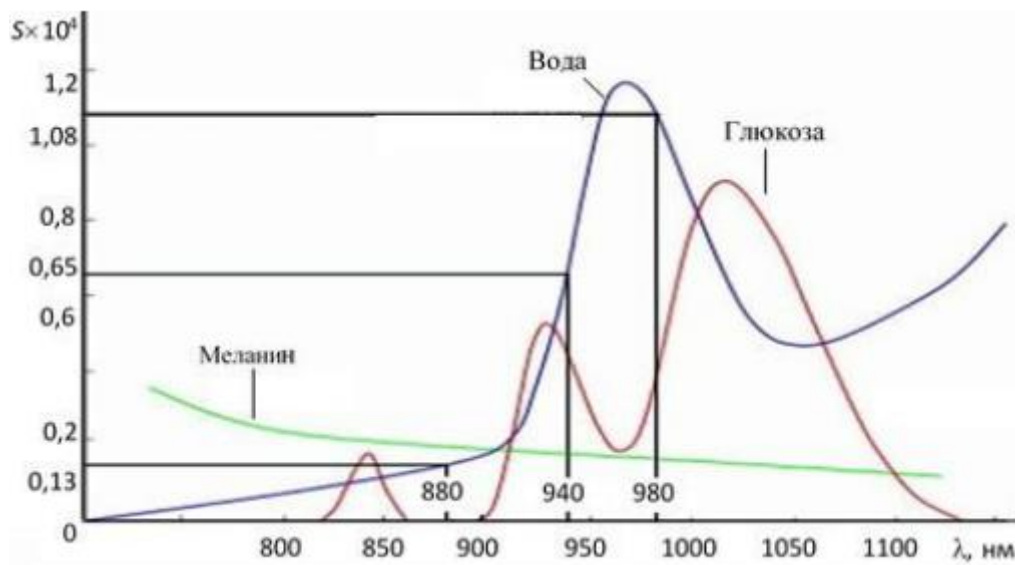


Рис. 1 – Спектральні коефіцієнти поглинання складових шкіри людини [1]

Одним з обмежень інфрачервоної спектроскопії (ІКС) для неінвазивного визначення глюкози є менший коефіцієнт поглинання глюкози в крові. Таким чином, слабкі спектральні смуги глюкози перекривають інші сильніші обертони комбінації смуг води, гемоглобіну, білка та жиру. Вимірювання глюкози може бути перервано за фізичними та хімічними характеристиками, такими як коливання артеріального тиску, температури тіла, зволоження шкіри, а також тригліцериди та альбумінами. А також зміни навколишнього середовища, такі як температура, вологість, вуглекислий газ та атмосферний тиск, можуть призвести до похибки у визначенні глюкози [15].

Головна проблема ІКС для моніторингу рівня глюкози в крові – це необхідність частого калібрування приладу. ІКС не лише вимірює один специфічний сигнал для глюкози, але й оцінює багато сигналів, які не є ні специфічними для глюкози, ні пов'язані з рівнями глюкози лінійним чином. На жаль, дослідження вимірювання глюкози *in vivo* з використанням ІКС показали неточні результати.

2. Середня інфрачервона спектроскопія.

Середня інфрачервона спектроскопія (СІКС) заснована на використанні світла із довжиною хвилі в діапазоні 2500-10000 нм. Фізичний принцип середньої інфрачервоної спектроскопії схожий на інфрачервону спектроскопію (ІКС). У порівнянні з інфрачервоною спектроскопією середня інфрачервона спектроскопія демонструє зниження розсіювання та збільшення поглинання, враховуючи вищі довжини хвиль. Проникнення світла в тканини людини можуть досягати кількох мікромметрів, тому розглядається лише відбите або розсіяне світло [16].

Перевага середньої інфрачервоної спектроскопії перед інфрачервоною спектроскопією у тому, що смуги поглинання глюкози гостріші у порівнянні з іншими сполуками і часто бувають широкими та слабкими. Обмеження у використанні цього методу – погане проникнення. На середню інфрачервону спектроскопію впливають ті ж проблеми та фактори, що і на інфрачервону спектроскопію.

3. Раманівська спектроскопія.

Раманівська спектроскопія (комбінаційного розсіювання) дає можливість виміряти молекулярний склад за рахунок непружного розсіювання та ідентифікувати коливальний стан (фотонів). Кожна молекула має свою власну частоту коливань чи частоти. Отже, об'єднаний спектр розсіяного світла забезпечує унікальне враження, яке може ідентифікувати молекулу. Спектроскопія має кілька переваг. Спектроскопія спостерігається в розсіяному світлі зразка, а не в спектрі поглинання зразка світла.

Отже, раманівська спектроскопія не вимагає спеціальної підготовки зразків та нечутлива до смуг поглинання. Це властивість спектроскопії комбінаційного розсіювання полегшує процес прямого вимірювання у твердому, рідкому та газоподібному середовищі, а також вимірювання через прозорі матеріали, такі як скло, кварц, пластик. Раманівська спектроскопія заснована на використанні лазерних коливань і обертань у молекулах розчину. Отже, можна отримати оцінку концентрації глюкози в рідинах організму, де вона зазвичай знаходиться в інтервалі 200-1800 cm^{-1} . У цій смузі спектр комбінаційного розсіювання глюкози значно відрізняється від спектру інших сполук. Фактично, раманівська спектроскопія надає більш точні дані, а завдяки впровадженню та вдосконаленню лазерів, приладів із зарядовим зв'язком та інших оптичних компонентів кількісний аналіз став можливим завдяки цьому методу.

4. Фотоакустична спектроскопія (ФАК).

Фотоакустична спектроскопія (ФАК) може використовуватися для виявлення поглинання глюкози в рідинах і газах. Ця технологія є одним із методів аналізу взаємодії світла з тканинами. У ФАК аналізуються результати, де показник заломлення середовища пов'язаний зі змінами, спричиненими коливаннями концентрації глюкози. Важливими є подальші дослідження, щоб зрозуміти механізми виникнення та поширення фотоакустичних сигналів у тканинах і можливості їх застосування для неінвазивного визначення рівня глюкози.

5. Поляризаційні зміни.

Коли поляризоване світло проходить через розчин із оптично активними розчинами (такими як хіральні молекули), світло повертає власну площину під певним кутом, який відповідає концентрації оптично активних розчинених речовин [12]. Глюкоза вважається хіральною молекулою та її властивості добре відомі. Практично, при дослідженні змін полярності глюкози був запропонований перший неінвазивний метод виміру глюкози у людей. Оптичні компоненти можна мінімізувати, використовуючи видиме світло, проте цей метод чутливий до розсіюючих властивостей досліджуваної тканини, які призводять до деполаризації світла, тому шкіра не може бути досліджена за допомогою поляриметрії [13]. Крім того, цей метод має низьку специфічність, оскільки в рідинах, що містять глюкозу людини, присутні й інші оптично активні сполуки, такі як аскорбат та альбумін

6. Оптична когерентна томографія (ГКТ).

Оптична когерентна томографія представляє собою неінвазивний метод аналізу тонких шарів шкіри, слизових оболонок, а також тканин ока та зубів у людей. Цей метод застосовується для створення детальних зображень таких структур, як сітківка, зоровий нерв або передня частина ока. Принцип методу ГКТ полягає в тому, що світлова хвиля проходить через тканину, де вона поширюється і відображається або розсіюється від внутрішніх шарів, які мають різноманітні властивості. Світло, відбите назад тканиною, комбінується зі світлом, відбитим контрольним плечем інтерферометра і в результаті інтерферометричний сигнал виявляється фотоприймачем. Блок-схема експериментальної системи ГКТ наведена на рис. 2.

Властивості розсіювання тканин сильно залежать від відношення показника заломлення центрів розсіювання (наприклад, компонентів клітин та білків) до показника заломлення проміжної рідини. У міру збільшення концентрації глюкози в інтерстиціальній рідині її показник заломлення також збільшується, що визначає зменшення невідповідності показника заломлення та коефіцієнта розсіювання [17]. Таким чином, на підставі даних ГКТ, що генеруються розсіяним світлом, може бути отримана оцінка концентрації глюкози в інтерстиціальній рідині. Чутливість

цієї техніки до руху є одним з обмежень. Невеликі зміни температури шкіри мають незначний вплив, зміни в кілька градусів суттєво впливають на сигнал.

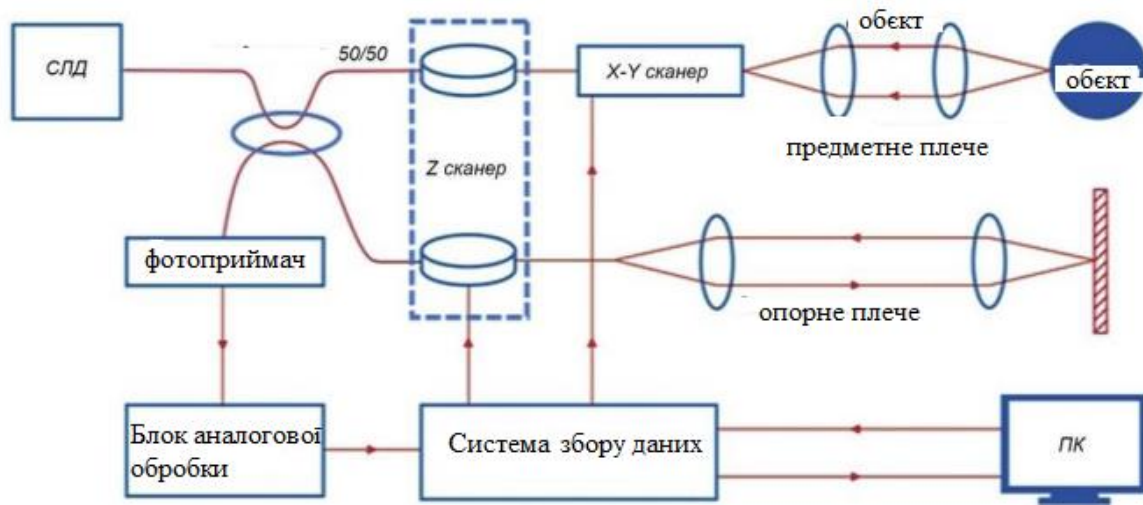


Рис. 2 – Блок-схема експериментальної системи ГКТ

7. Фотонний кристал

Фотонні кристали (ФК) є штучними періодичними діелектричними структурами (матеріалами) з шириною забороненої зони, що запобігає поширенню світла в певному діапазоні частот. Формуючи точкові недоліки (або резонансні порожнини) у цьому кристалі, ми можемо захоплювати фотони в «пастках» нелегальної зони (локалізувати фотони в зазорах дефекту) і потім застосувати їх особливим чином. Діапазон частот та інші параметри такого резонатора можна встановити у простий спосіб.

Ідея фотонних кристалів була вперше запропонована 1987 року Елі Яблоновичем (співробітником Каліфорнійського університету в Каліфорнії). Однак запропонована ним технологія не підходила для формування кристалічної структури, яка б дозволяла працювати з широкими оптичними довжинами хвиль (850, 1310, 1550 нм). Ця проблема вирішується за допомогою нової технології, розробленої ScandiaLab (США). Технологічний процес полягає у нанесенні шару кремнію на підкладку SiO_2 з подальшим створенням точкових дефектів у шарі Si, зазвичай періодичних, але з локальними нерівностями, що призводить до необхідних ефектів. Фотонні кристали дозволяють досягати ефектів, які недоступні для звичайних оптичних пристроїв, таких як пропускання оптичного променя з поворотом на 90° зі втратою потужності (рис. 3).



Рис. 3 – Розроблений [17] оптичний сенсор у вигляді кліпси для неінвазивної оцінки вмісту глюкози в крові людини: а) вид пристрою; б) процес встановлення на кінцівках пальця

Група Ашера розробила фотонно-чутливий матеріал із полімеризованих кристалічних колоїдних матриць (ПККМ) для неінвазивного визначення глюкози. ПККМ являють собою періодичні кристалічні колоїдні матриці сферичних полістирольних колоїдів, полімеризованих у тонких плівках гідрогелю. Масиви діють як дифракційна решітка для білого світла та виявлення певної довжини дифрагованої хвилі під певним кутом огляду між напрямом поширення падаючого світла і дифракційними площинами [17].

Бреггівська дифракція залежить від показника заломлення системи (розчинник, гідрогель та колоїди) та відстані між дифракційними площинами (відстань d). Увімкнення заряджених частинок або зміна електричного заряду в ПККМ призводить до розширення масивів і, таким чином, змінюється відстань між площинами, що відхиляються. Потім дифракційна картина змінюється і призводить до зсуву довжини хвилі у світлі, відбитому від масиву. Декілька досліджень показали здатність плівок ПККМ виявляти іони металів [18], креатинін та глюкозу.

Група Ашера створила фотонний сенсор глюкози у вигляді тонкої дифракційної гідрогелевої плівки ПККМ, що містить кристали глюкозооксидази або фенілборонової кислоти як елементів молекулярного розпізнавання. Приєднання глюкози змінює розподіл заряду. Захоплення глюкози глюкозооксидазою або фенілбороновою кислотою призводить до зміни відстані d рівняння Брегга і викликає зрушення в довжинах хвиль дифрагованого світла.

8. Флуоресцентна технологія

Застосування флуоресценції для моніторингу глюкози почалося в 1980-х роках, коли Шульц, застосовуючи підхід, заснований на використанні оптоволокна, використовував глюкозо-зв'язуючий білок, що зустрічається в природі, Конканавалін А в аналізі конкурентного зв'язування з високомолекулярним декстраном. Крім того, новий підхід з використанням синтетичного рецептора, відомого як боронова кислота, була введена в 1990-х роках. Так само був розроблений ферментативний підхід, в якому використовувалася глюкозооксидаза для вимірювання власної флуоресценції.

Наприкінці 1990-х дослідники почали оцінювати датчик глюкози, використовуючи дезактивований фермент, як рецептор, а не каталізатор. У 2000-х роках було зроблено нові досягнення у розробці нового біосенсора. На сьогоднішній день кілька рецепторів, включаючи глюкозо-зв'язувальні лектини апоферменти та синтетичні рецептори боронової кислоти, були використані для визначення глюкози [19].

Системи на основі флуоресценції привертають більше уваги через їхню високу чутливість. Ця система практично не пошкоджує систему та дозволяє вимірювати інтенсивність флуоресценції, а також час згасання флуоресценції. Втім, використання ультрафіолетового світла у тканинах може призвести до явищ розсіювання та флуоресценції. Більше того, навіть за використання різних довжин хвиль явище флуоресценції може залежати не тільки від глюкози, але і від таких параметрів, як меланін шкіри, гемоглобін та товщина епідермісу.

Висновки

У статті представлено опис основних оптичних технологій для неінвазивного моніторингу глюкози. Поява нових методів виявлення, покращення вимірювальних технологій і методів зниження шуму зробили свій внесок у неінвазивний моніторинг рівня глюкози. Виділені переваги та недоліки неінвазивних методів вимірювання глюкози у крові.

До переваг можна віднести:

- відсутність ризику передачі інфекцій через кров;
- відсутність необхідності забору біоматеріалу;
- відсутність необхідності використання витратного матеріалу (тест-смужки).

Виділені недоліки:

- необхідність індивідуального калібрування для кожного пацієнта;
- складність технічної реалізації;
- складність обліку сукупності всіх факторів, які роблять внесок у вимір.

Чутливість до численних фізіологічних факторів, факторів навколишнього середовища та активності, які часто змінюються у звичайному повсякденному житті, призвела до того, що деякі технології ще не були використані в пристроях, у той час як інші призвели до створення пристроїв, принаймні, у просунутому стані прототипу. Ці методи можуть бути застосовані для вдосконалення існуючих приладів неінвазивної діагностики концентрації глюкози оптичними

аналізаторами, з метою покращення якості та точності вимірювань, що є першочерговим завданням для приладів такого типу.

Таким чином, спектрофотометрія виступає як обладдйливий метод для аналізу оптичних характеристик, хімічного складу, структурних особливостей та місцевих відхилень у біотканинах. Ця техніка забезпечує точне кількісне визначення ступеня та об'єму ураження біологічних тканин, дозволяючи глибше зрозуміти механізми їхніх змін. Однією з ключових переваг спектрофотометрії є її здатність виявляти варіації в епітеліальних тканинах та пухлинах, що розташовані в глибоких шарах внутрішніх органів. Ця особливість методу дозволяє здійснювати раннє виявлення різних захворювань, значно підвищуючи шанси на успішне лікування та відновлення пацієнтів.

Перелік використаних джерел:

1. Henkenjohann R. Role of individual motivations and privacy concerns in the adoption of german electronic patient record apps – a mixed-methods study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. Article 9553. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189553>.
2. Healthcare information exchange using blockchain technology / Murugan A., Chechare T., Muruganantham B., Ganesh Kumar S. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2020. Vol. 10. Pp. 421-426. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i1.pp421-426>.
3. Xiao S., Pan, X. What drives firms to go green in China? The role of digitalization. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(1). Article 234. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17010234>.
4. Towards the development of digital manufacturing ecosystems for sustainable performance: learning from the past two decades of research / A. F. Shahatha Al-Mashhadani et al. *Energies*. 2021. Vol. 14. Article 2945. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102945>.
5. Amann J., Sleight J., Vayena E. Digital contact-tracing during the Covid-19 pandemic: An analysis of newspaper coverage in Germany, Austria, and Switzerland. *PLOS ONE*. 2021. Vol. 16(2). Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246524>.
6. Wang C. IoT-enabled remote patient monitoring for chronic disease management: Exploring the use of IoT devices for remote monitoring of patients with chronic diseases. *Journal of Machine Learning for Healthcare Decision Systems*. 2024. Vol. 2(1). Pp. 27-33.
7. The LatAm-FINGERS initiative: The first non-pharmacological randomized controlled trial to prevent cognitive decline across Latin America / G. E. Sevlever et al. *International Psychogeriatrics*. 2024. Vol. 36. Iss. S1. Pp. 10-13. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1041610224001029>.
8. Henkenjohann R. Role of individual motivations and privacy concerns in the adoption of german electronic patient record apps – a mixed-methods study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. Article 9553. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189553>.
9. Recreational team sports: Prevention, treatment, and rehabilitation of non-communicable diseases. URL: <https://www.frontiersin.org/research-topics/59862/recreational-team-sports-prevention-treatment-and-rehabilitation-of-non-communicable-diseases> (дата звернення: 15.07.2024).
10. A rapid systematic review of the effect of health or peer volunteers for diabetes self-management: Synthesizing evidence to guide social prescribing / T. Iverson et al. *PLOS Global Public Health*. 2024. Pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0004071>.
11. Lau D. C., Teoh H. Impact of Current and Emerging Glucose-Lowering Drugs on Body Weight in Type 2 Diabetes. *The Canadian Journal of Diabetes*. 2020. Vol. 39(5). Pp. 148-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjcd.2015.09.090>.
12. Liu X., Zhang J. Continuous glucose monitoring in prediabetes management: A comprehensive perspective. *Frontiers in Endocrinology*. 2024. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/endocrinology/articles/10.3389/fendo.2024.1472898/full> (дата звернення: 15.09.2024).
13. Маліновський В. І. Метод та оптичний сенсор підвищення точності неінвазивного моніторингу концентрацій показників крові людини. *Photonics-ODS : тези доповіді VI-ї Міжн. наук.-техн. конф., м. Вінниця 1-4 жовтня 2012 р. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. С 151.*

14. Internet of Diagnostic Things: Emerging Horizon towards Precision and Digital Health Care / V. Verma, A. Mishra, V. Bisht, J. Bala. *Journal of Health and Social Research*. 2021. Vol. 41(1). Pp. 25-36. DOI: <https://doi.org/10.7324/JHSR/2020/24981>.
15. Pathophysiological characterization of the ApoE^{-/-;db/db} mouse: A model of diabetes and atherosclerosis / M. Paniagua-Sancho et al. *Methods*. 2025. Vol. 243. Pp. 223-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2025.01.002>.
16. Intermittent use of flash glucose monitoring improves glycemic control in Chinese older patients with type 2 diabetes mellitus / Y. Hu et al. *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy*. 2025. Vol. 18. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.2147/DMSO.S498620>.
17. Cognition and influencing factors of secondary prevention in patients with ischemic stroke 1 year after discharge in southwest China: A cross-sectional survey / X. Zhong et al. *Frontiers in Neurology*. 2024. Vol. 15. Pp. 01-07. DOI: <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1488180>.
18. Okura T. The importance of the time in target range (TTR) of glucose and blood pressure. *Hypertension Research*. 2024. Pp. 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41440-024-02054-2>.
19. Validation of Time in Range as an Outcome Measure for Diabetes Clinical Trials / R.W. Beck. *Diabetes Care*. 2019. Vol. 42(3). Pp. 400-405. DOI: <https://doi.org/10.2337/dc18-1444>.

References:

1. R. Henkenjohann, «Role of individual motivations and privacy concerns in the adoption of german electronic patient record apps – a mixed-methods study», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, article 9553, 2021. doi: 10.3390/ijerph18189553.
2. A. Murugan, T. Chechare, B. Muruganantham, and S. Ganesh Kumar, «Healthcare information exchange using blockchain technology», *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, pp. 421-426, 2020. doi: 10.11591/ijece.v10i1.pp421-426.
3. S. Xiao, and X. Pan, «What drives firms to go green in China? The role of digitalization», *Sustainability*, vol. 17(1), article 234, 2025. doi: 10.3390/su17010234.
4. A.F. Shahatha Al-Mashhadani, M.I. Qureshi, S.S. Hishan, M.S. Md Saad, Y. Vaicondam, and N. Khan, «Towards the development of digital manufacturing ecosystems for sustainable performance: learning from the past two decades of research», *Energies*, vol. 14, article 2945, 2021. doi: 10.3390/en14102945.
5. J. Amann, J. Sleight, and E. Vayena, «Digital contact-tracing during the Covid-19 pandemic: An analysis of newspaper coverage in Germany, Austria, and Switzerland», *PLOS ONE*, vol. 16(2), pp. 1-16, 2021. doi: 10.1371/journal.pone.0246524.
6. C. Wang, «IoT-enabled remote patient monitoring for chronic disease management: Exploring the use of IoT devices for remote monitoring of patients with chronic diseases», *Journal of Machine Learning for Healthcare Decision Systems*, vol. 2(1), pp. 27-33, 2024.
7. G. E. Sevillever, L. Crivelli, R. M. Salinas, A. Charamelo, and C. Delgado, «The LatAm-FINGERS initiative: The first non-pharmacological randomized controlled trial to prevent cognitive decline across Latin America», *International Psychogeriatrics*, vol. 36, iss. S1, pp. 10-13, 2024. doi: 10.1017/S1041610224001029.
8. R. Henkenjohann, «Role of individual motivations and privacy concerns in the adoption of german electronic patient record apps – a mixed-methods study», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, article 9553, 2021. doi: 10.3390/ijerph18189553.
9. Recreational team sports: Prevention, treatment, and rehabilitation of non-communicable diseases. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/research-topics/59862/recreational-team-sports-prevention-treatment-and-rehabilitation-of-non-communicable-diseases>. Accessed on: July 15, 2024.
10. T. Iverson et al., «A rapid systematic review of the effect of health or peer volunteers for diabetes self-management: Synthesizing evidence to guide social prescribing», *PLOS Global Public Health*, pp. 1-23, 2024. doi: 10.1371/journal.pgph.0004071.
11. D.C. Lau, and H. Teoh, «Impact of Current and Emerging Glucose-Lowering Drugs on Body Weight in Type 2 Diabetes», *The Canadian Journal of Diabetes*, vol. 39(5), pp. 148-154, 2020. doi: 10.1016/j.jcjd.2015.09.090.
12. X. Liu, J. Zhang, «Continuous glucose monitoring in prediabetes management: A comprehensive perspective». *Frontiers in Endocrinology*, 2024. [Online]. Available:

- <https://www.frontiersin.org/journals/endocrinology/articles/10.3389/fendo.2024.1472898/full>. Accessed on: September 15, 2024.
13. V.I. Malinovskyi, «Metod ta optychnyi sensor pidvyshchennia tochnosti neinvazyvnoho monitorynhu kontsentratsii pokaznykiv krovi liudyny» [«Method and optical sensor for increasing the accuracy of non-invasive monitoring of human blood concentration parameters»], in Proc. VI Int. Sci.-Tech. Conf. «Photonics-ODS», Vinnytsia, 2012, pp. 151. (Ukr.)
 14. V. Verma, A. Mishra, V. Bisht, and J. Bala, «Internet of Diagnostic Things: Emerging Horizon towards Precision and Digital Health Care», *Journal of Health and Social Research*, vol. 41(1), pp. 25-36, 2021. doi: **10.7324/JHSR/2020/24981**.
 15. M.P. Paniagua-Sancho, A.G. Casanova, L. Rodríguez-Estévez, I. Cruz-González, F.J. López-Hernández, and C. Martínez-Salgado, «Pathophysiological characterization of the ApoE^{-/-};db/db mouse: A model of diabetes and atherosclerosis», *Methods*, vol. 243, pp. 223-232, 2025. doi: **10.1016/j.ymeth.2025.01.002**.
 16. Y. Hu, R. Yan, Y. Shen, H. Li, J. Ma, and X. Su, «Intermittent use of flash glucose monitoring improves glycemic control in Chinese older patients with type 2 diabetes mellitus», *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy*, vol. 18, pp. 1-9, 2025. doi: **10.2147/DMSO.S498620**.
 17. X. Zhong, L. Li, Q. Ye, J. Wang, L. He, and C. Li, «Cognition and influencing factors of secondary prevention in patients with ischemic stroke 1 year after discharge in southwest China: A cross-sectional survey», *Frontiers in Neurology*, vol. 15, pp. 01-07, 2024. doi: **10.3389/fneur.2024.1488180**.
 18. T. Okura, «The importance of the time in target range (TTR) of glucose and blood pressure», *Hypertension Research*, pp. 1-3, 2024. doi: **10.1038/s41440-024-02054-2**.
 19. R.W. Beck, «Validation of Time in Range as an Outcome Measure for Diabetes Clinical Trials», *Diabetes Care*, vol. 42(3), pp. 400-405, 2019. doi: **10.2337/dc18-1444**.

Стаття надійшла 22.10.2024

Стаття прийнята 02.12.2024