

ЦИФРОВИЙ МОНІТОРИНГ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОЇ ЕКСПОЗИЦІЇ ЯК СКЛАДОВА ПРОФІЛАКТИКИ РАКУ ШКІРИ

Ковтун Л.О.^{1,2}

¹ Одеський національний медичний університет, м. Одеса, Україна

² Комунальне некомерційне підприємство «Одеський регіональний клінічний протипухлинний центр» Одеської обласної ради, м. Одеса, Україна

- **МЕТА.** Провести порівняльний аналіз сучасних цифрових і традиційних підходів до моніторингу ультрафіолетової (УФ) експозиції та оцінки ризику злоякісних новоутворень шкіри, визначити їх переваги, обмеження та перспективи застосування.
- **МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ.** Проведено наративний аналітичний огляд публікацій 2020–2026 рр. у базах PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science та Google Scholar, а також матеріалів WHO, IARC і GLOBOCAN. Дані узагальнено методом якісного порівняльного синтезу.
- **РЕЗУЛЬТАТИ.** Встановлено, що традиційні та цифрові підходи виконують взаємодоповнювальні функції. УФ-індекс і моніторинг довкілля характеризують потенційну небезпеку на популяційному рівні, тоді як персональні УФ-сенсори забезпечують оцінку індивідуальної експозиції. mHealth-технології сприяють персоналізації профілактики та покращенню фотозахисної поведінки, а штучний інтелект і теледерматологія розширюють можливості стратифікації ризику, діагностичної підтримки та маршрутизації пацієнтів.
- **ВИСНОВКИ.** Цифрові технології доцільно використовувати як доповнення до традиційного УФ-моніторингу та дерматологічного спостереження. Їх подальше впровадження потребує стандартизації, клінічної валідації, захисту персональних даних та оцінки ефективності в реальних умовах.
- **КЛЮЧОВІ СЛОВА:** *УФ-експозиція, моніторинг, УФ-сенсори, mHealth, штучний інтелект, теледерматологія, рак шкіри, громадське здоров'я.*

DIGITAL MONITORING OF ULTRAVIOLET EXPOSURE AS PART OF SKIN CANCER PREVENTION

Kovtun L.O.^{1,2}

¹ Odesa National Medical University, Odesa, Ukraine

² Municipal Non-Profit Enterprise «Odesa Regional Clinical Antitumor Center» of the Odesa Regional Council, Odesa, Ukraine

- **OBJECTIVE.** To conduct a comparative analysis of contemporary digital and traditional approaches to monitoring ultraviolet (UV) exposure and assessing the risk of malignant skin neoplasms, and to identify their advantages, limitations, and prospects for application.
- **MATERIALS AND METHODS.** A narrative review of publications from 2020 to 2026 indexed in PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, and Google Scholar was conducted. Official materials from the World Health Organization (WHO), International Agency for Research on Cancer (IARC), and Global Cancer Observatory (GLOBOCAN) were also analyzed. The findings were summarized using a qualitative comparative synthesis.
- **RESULTS.** Traditional and digital approaches were found to have complementary roles. The UV Index and environmental UV monitoring characterize potential UV hazards at the population level, whereas personal UV sensors enable the assessment of individual UV exposure. mHealth technologies facilitate personalized prevention and improvements in sun-protective behavior, while artificial intelligence and teledermatology expand opportunities for risk stratification, diagnostic decision support, and patient triage.
- **CONCLUSIONS.** Digital technologies should be considered complementary to traditional UV monitoring and dermatological surveillance rather than as replacements for these approaches. Their further implementation requires standardization, clinical validation, protection of personal data, and evaluation of their effectiveness in real-world settings.
- **KEYWORDS:** *UV exposure, monitoring, UV sensors, mHealth, artificial intelligence, teledermatology, skin cancer, public health.*

ВСТУП

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання є одним із провідних модифікованих канцерогенних факторів довкілля. Незважаючи на його фізіологічну роль, зокрема участь у синтезі вітаміну D, надмірна або тривала УФ-експозиція асоціюється з фотостарінням, імуносупресією та розвитком злоякісних новоутворень шкіри. Відповідно до класифікації Міжнародного

агентства з вивчення раку (International Agency for Research on Cancer, IARC), сонячне УФ-випромінювання належить до канцерогенів I групи та має доведений причинно-наслідковий зв'язок із розвитком меланоми, базальноклітинної та плоскоклітинної карциноми шкіри [1].

Глобальний тягар УФ-асоційованих злоякісних новоутворень шкіри залишається значним. За оцінками Всесвітньої організації охо-

рони здоров'я (BOO3), у 2020 році надмірна УФ-експозиція була пов'язана приблизно з 1,2 млн нових випадків немеланомного раку шкіри та 325 тис. випадків меланоми, а також із 64 тис. передчасних смертей від немеланомних злоякісних новоутворень шкіри та 57 тис. смертей від меланоми. Характер експозиції має самостійне значення для формування канцерогенного ризику: кумулятивне сонячне опромінення відіграє особливу роль у розвитку плоскоклітинної карциноми, тоді як інтенсивна інтермітуюча експозиція та сонячні опіки є важливими факторами ризику меланоми [1, 2].

За даними GLOBOCAN 2022, у світі було зареєстровано близько 331,7 тис. нових випадків меланоми шкіри та 58,7 тис. смертей від цього захворювання. Показники захворюваності характеризуються значною географічною неоднорідністю: стандартизований за віком показник становив 29,8 на 100 тис. населення в Океанії, 16,3 — у Північній Америці та 10,4 — у Європі порівняно з глобальним показником 3,2 на 100 тис. населення. В Австралії цей показник досягав 37,0 на 100 тис. населення [3].

Атрибутивний внесок УФ-випромінювання у формування цього тягаря є суттєвим: за оцінками IARC, понад 80% випадків меланоми шкіри, зареєстрованих у світі у 2022 році, були пов'язані з впливом УФ-випромінювання — приблизно 267 тис. із 332 тис. нових випадків. Прогностичні моделі свідчать, що за умови збереження сучасних тенденцій кількість нових випадків меланоми у світі до 2040 року може зрости більш ніж на 50% порівняно з 2020 роком. Зростання тягаря злоякісних новоутворень шкіри спостерігається також серед населення старших вікових груп, що посилює актуальність удосконалення стратегій первинної та вторинної профілактики [4–6].

Проблема залишається актуальною і для України. За оприлюдненими даними щодо онкологічної захворюваності, у 2022–2023 роках в Україні було зареєстровано 5051 випадок меланоми, а станом на 2023 рік на обліку перебували 31 217 пацієнтів із цим захворюванням. Наведені показники обґрунтовують необхідність удосконалення профілактичних заходів, спрямованих на контроль модифікованих факторів ризику та своєчасне виявлення злоякісних новоутворень шкіри [7].

Індивідуальна УФ-експозиція формується під впливом комплексу природних, професійних і поведінкових факторів, серед яких географічна широта, сезон, час доби, атмосферні

умови, відбивна здатність поверхонь, тривалість перебування просто неба, характер професійної діяльності та фотозахисна поведінка. Особливе значення має професійна експозиція серед працівників, які значну частину робочого часу проводять просто неба, зокрема моряків, будівельників, працівників сільського господарства, дорожніх служб і рятувальників, для яких характерне тривале кумулятивне сонячне навантаження [8].

Оцінка сучасного УФ-навантаження потребує також урахування змін кліматичної системи. Рівень сонячного УФ-випромінювання, що досягає поверхні Землі, визначається висотою Сонця над горизонтом, географічною широтою, висотою над рівнем моря, станом стратосферного озонового шару, хмарністю, атмосферними аерозолями та відбивною здатністю поверхні. Вплив кліматичних змін на УФ-експозицію не є односпрямованим і може реалізовуватися через зміни атмосферних параметрів, а також опосередковано — через зміну температурного режиму, тривалості теплого сезону та характеру професійної й рекреаційної активності населення просто неба [9].

Традиційні підходи до оцінки УФ-навантаження ґрунтуються переважно на УФ-індексі, наземному або супутниковому моніторингу, метеорологічних показниках та самооцінці сонячної експозиції. УФ-індекс є стандартизованим інструментом оцінки потенційної небезпеки сонячного УФ-випромінювання на популярному рівні, проте не відображає фактичну дозу, отриману конкретною людиною. Самооцінка експозиції також має методологічні обмеження, пов'язані з похибками пам'яті та неточністю визначення тривалості й інтенсивності перебування на сонці [10].

Розвиток цифрових технологій розширив можливості оцінки УФ-експозиції та профілактики злоякісних новоутворень шкіри. Носимі УФ-сенсори забезпечують безпосередню реєстрацію персональної експозиції та її накопичення в часі, тоді як мобільні та mHealth-технології дозволяють інтегрувати ці дані з індивідуальними факторами ризику та використовувати їх для підтримки фотозахисної поведінки. Алгоритми штучного інтелекту застосовуються для аналізу цифрових зображень шкіри, стратифікації ризику та підтримки діагностичних рішень, а цифрова дерматоскопія й теледерматологія розширюють можливості дистанційної оцінки підозрілих новоутворень і маршрутизації пацієнтів [10–13].

Водночас збільшення обсягу персоналізованих даних і технологічних можливостей не є достатнім доказом покращення клінічних результатів. Для різних цифрових технологій доказова база характеризується неоднорідністю дизайнів досліджень, кінцевих точок і методів валідації. Підвищення точності вимірювання персональної УФ-експозиції не можна безпосередньо ототожнювати зі зниженням ризику раку шкіри, а висока діагностична ефективність алгоритмів штучного інтелекту не усуває необхідності зовнішньої валідації та клінічного контролю. Отже, актуальним залишається не лише опис цифрових технологій, а їх критичне порівняння з традиційними підходами за показниками точності, доказової ефективності, рівня персоналізації, обмежень і сфери практичного застосування.

Мета дослідження — провести порівняльний аналіз сучасних цифрових і традиційних підходів до моніторингу ультрафіолетової експозиції та оцінки ризику злоякісних новоутворень шкіри, узагальнити дані щодо їх точності та профілактичної ефективності, визначити переваги, обмеження і перспективні сфери застосування цифрових технологій у системі громадського здоров'я.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Дослідження виконано у форматі нарративного аналітичного огляду літератури з порівняльним синтезом наукових даних щодо традиційних і цифрових підходів до моніторингу ультрафіолетової (УФ) експозиції, профілактики та оцінки ризику злоякісних новоутворень шкіри.

Пошук наукових публікацій проводили в електронних базах даних PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science та Google Scholar. Додатково аналізували офіційні матеріали World Health Organization (WHO), International Agency for Research on Cancer (IARC) та Global Cancer Observatory (GLOBOCAN), що містили актуальні епідеміологічні дані, відомості щодо УФ-експозиції та міжнародні рекомендації з профілактики УФ-асоційованих захворювань. Основний часовий інтервал пошуку охоплював публікації 2021–2026 рр.

Пошукову стратегію формували з використанням ключових слів та їх логічних комбінацій: «ultraviolet radiation», «UV exposure», «UV monitoring», «UV index», «personal UV exposure», «UV dosimetry», «wearable UV sensor», «wearable UV dosimeter», «digital health», «mHealth», «mo-

bile health», «artificial intelligence», «machine learning», «teledermatology», «teledermoscopy», «skin cancer prevention», «melanoma», «non-melanoma skin cancer», «skin cancer risk», «public health». Для пошуку досліджень, у яких оцінювали ефективність і точність відповідних технологій, додатково застосовували терміни «accuracy», «sensitivity», «specificity», «AUC», «validation», «measurement error», «adherence», «behavioral outcomes» та «clinical outcomes».

До огляду включали систематичні огляди та метааналізи, рандомізовані контрольовані дослідження, проспективні й ретроспективні когортні дослідження, дослідження діагностичної точності та валідації, популяційні дослідження, а також релевантні нарративні огляди, присвячені моніторингу сонячної УФ-експозиції, персональній УФ-дозиметрії, носимим УФ-сенсорам, мобільним і mHealth-технологіям, алгоритмам штучного інтелекту, цифровій дерматоскопії та теледерматології в контексті профілактики, оцінки ризику та раннього виявлення злоякісних новоутворень шкіри. Додатково включали офіційні документи міжнародних організацій, що містили релевантні епідеміологічні, нормативні та методичні дані.

Не включали публікації, що не відповідали меті огляду; роботи, у яких цифрові технології не були пов'язані з УФ-експозицією, профілактикою або оцінкою ризику злоякісних новоутворень шкіри; дублікати; матеріали без достатнього опису методології або оцінюваних кінцевих точок; рекламні та неакадемічні матеріали, а також джерела, для яких неможливо було встановити походження первинних даних.

Під час аналізу включених публікацій оцінювали дизайн дослідження, характеристики досліджуваної популяції, тип традиційної або цифрової технології, метод порівняння, основні кінцеві точки та кількісні показники результативності. Для досліджень персональної УФ-дозиметрії враховували точність вимірювання, відтворюваність, валідність і похибку вимірювання; для цифрових профілактичних втручань — прихильність до їх використання та зміни фотозахисної поведінки; для алгоритмів штучного інтелекту — чутливість, специфічність, діагностичну точність, площу під ROC-кривою (AUC) та наявність зовнішньої валідації. Для інтервенційних досліджень додатково враховували розмір ефекту, статистичну значущість та довірчі інтервали за їх наявності.

Порівняльний аналіз проводили відповідно до характеру оцінюваних кінцевих точок. Для

персональних цифрових технологій компараторами слугували УФ-індекс, наземний і супутниковий моніторинг УФ-випромінювання та самооцінка сонячної експозиції; для технологій оцінки шкірних новоутворень — стандартна клінічна та/або дерматоскопічна оцінка лікарем. Порівнювали лише методи, що характеризували зіставні кінцеві точки.

Критичну оцінку доказів здійснювали з урахуванням дизайну дослідження, характеристик і обсягу вибірки, наявності групи порівняння, характеру кінцевих точок, способу валідації технології та можливості екстраполяції результатів на реальні клінічні або популяційні умови. При формуванні висновків пріоритет надавали систематичним оглядам і метааналізам, рандомізованим контрольованим дослідженням, проспективним дослідженням та дослідженням діагностичної точності із зовнішньою валідацією. Результати пілотних, технічних та proof-of-concept досліджень розглядали як попередні та не екстраполювали на довгострокові клінічні результати без відповідного підтвердження.

Методологічну якість підготовки нарративного огляду забезпечували відповідно до принципів SANRA (Scale for the Assessment of Narrative Review Articles), зокрема шляхом чіткого формулювання мети, опису інформаційних джерел і пошукової стратегії, обґрунтованого відбору доказів, критичного аналізу літератури та підтвердження ключових положень відповідними джерелами [14].

З огляду на гетерогенність включених досліджень за дизайном, характеристиками популяцій, типами цифрових технологій, компараторами та кінцевими точками власний метааналіз не проводили. Результати узагальнювали методом якісного порівняльного синтезу за основними напрямками: традиційний моніторинг УФ-випромінювання, персональна УФ-дозиметрія та носимі УФ-сенсори, mHealth і мобільні втручання, алгоритми штучного інтелекту, цифрова дерматоскопія та теледерматологія. Для кожного напрямку аналізували доказову ефективність, переваги, обмеження, рівень персоналізації та потенційні сфери застосування на індивідуальному, клінічному й популяційному рівнях.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Wearable UV sensors: сучасні технології персоналізованого моніторингу ультрафіолетової експозиції. Носимі сенсори ультрафіоле-

тового випромінювання (wearable UV sensors) є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку цифрової медицини та персоналізованої профілактики раку шкіри. Їх головною перевагою є можливість безперервного вимірювання індивідуальної ультрафіолетової експозиції в реальному часі, що забезпечує більш об'єктивну оцінку УФ-навантаження порівняно з традиційними методами, заснованими на ультрафіолетовому індексі або самооцінці тривалості перебування на сонці [10, 15].

Сучасні wearable UV sensors представлені електронними та фотохромними пристроями, які можуть інтегруватися у браслети, смарт-годинники, бейджі, захисний одяг, каски, окуляри, медичні пластирі та інші засоби індивідуального користування [16]. Електронні сенсори використовують фотодіоди або напівпровідникові елементи для кількісного визначення інтенсивності UVA- та UVB-випромінювання, тоді як фотохромні сенсори функціонують на основі зміни кольору спеціальних полімерних матеріалів під впливом ультрафіолетового випромінювання, забезпечуючи швидку візуальну оцінку рівня експозиції [10].

Останніми роками активно розробляються гнучкі біосумісні сенсори на основі органічної електроніки, графену, наноматеріалів та еластичних полімерів, які можуть безпосередньо фіксуватися на поверхні шкіри або інтегруватися в текстильні матеріали. Такі пристрої характеризуються малою товщиною, високою механічною стійкістю, низьким енергоспоживанням і можливістю тривалого автономного використання без істотного впливу на повсякденну активність користувача [17].

Важливою технологічною особливістю сучасних УФ-сенсорів є можливість бездротової передачі інформації за допомогою Bluetooth Low Energy або Near Field Communication (NFC). Це забезпечує синхронізацію отриманих даних із мобільними застосунками, електронними медичними системами та іншими цифровими платформами, створюючи основу для подальшого аналізу індивідуальної ультрафіолетової експозиції [18].

Практичне значення wearable UV sensors найбільшою мірою проявляється серед осіб із високим ризиком розвитку злоякісних новоутворень шкіри, насамперед працівників, діяльність яких пов'язана з тривалим перебуванням просто неба. Використання носимих сенсорів дозволяє об'єктивно оцінювати накопичену ультрафіолетову експозицію протягом робо-

чої зміни, що створює передумови для оптимізації фотозахисних заходів та впровадження сучасних програм професійної профілактики [8, 19].

Незважаючи на стрімкий розвиток технологій, широке впровадження wearable UV sensors у практику громадського здоров'я потребує стандартизації методів вимірювання, клінічної валідації отриманих даних, уніфікації технічних характеристик пристроїв та оцінки їх клінічної й економічної ефективності.

Мобільні застосунки як інструмент персоналізованої профілактики ультрафіолетової експозиції. Мобільні застосунки (mobile health, mHealth) є ключовим компонентом сучасних систем цифрового моніторингу ультрафіолетової експозиції, забезпечуючи інтеграцію, аналіз і візуалізацію даних, отриманих із різних джерел. На відміну від носимих УФ-сенсорів, які здійснюють безпосереднє вимірювання ультрафіолетового випромінювання, мобільні застосунки виконують функції обробки інформації, оцінки індивідуального ризику та підтримки прийняття профілактичних рішень [20].

Основою роботи більшості сучасних застосунків є інтеграція персональних даних користувача з інформацією про фактори довкілля. Під час первинного налаштування враховуються фототип шкіри за Фіцпатріком, вік, стать, професійна діяльність, анамнез сонячних опіків, кількість меланоцитарних невусів, сімейний анамнез злоякісних новоутворень шкіри та інші фактори ризику. Одночасно застосунок автоматично отримує дані про поточний ультрафіолетовий індекс, географічне розташування, погодні умови та тривалість перебування користувача на відкритому повітрі [11, 21].

За наявності wearable UV sensors мобільний застосунок синхронізує інформацію про фактичну індивідуальну УФ-експозицію, поєднуючи її з даними про умови навколишнього середовища та індивідуальні характеристики користувача. Це дає змогу накопичувати інформацію про добову, тижневу та місячну ультрафіолетову експозицію, аналізувати її динаміку, візуалізувати результати у вигляді графіків і визначати тенденції зміни індивідуального ультрафіолетового навантаження [15].

Важливою функцією мобільних застосунків є трансформація отриманих даних у практичні профілактичні рекомендації. На підставі комплексного аналізу застосунків автоматично повідомляє користувача про підвищений рівень ультрафіолетового випромінювання, орієнтов-

ний безпечний час перебування на сонці, необхідність повторного нанесення сонцезахисного засобу, використання захисного одягу або обмеження перебування на відкритому повітрі. Такий підхід сприяє формуванню фотозахисної поведінки та підвищує прихильність до профілактичних заходів [11].

Крім моніторингу ультрафіолетової експозиції, сучасні мобільні застосунки підтримують регулярне самообстеження шкіри. Вони містять нагадування про проведення огляду, алгоритми оцінки пігментних утворень за критеріями ABCDE, можливість фотодокументування новоутворень та порівняння зображень у динаміці [22]. Інтеграція з теледерматологічними платформами забезпечує дистанційну передачу клінічних або дерматоскопічних зображень лікарю, що сприяє своєчасному виявленню підозрілих змін і оптимізації маршрутизації пацієнтів [23]. У системі громадського здоров'я мобільні застосунки мають важливе значення як джерело стандартизованих цифрових даних про індивідуальну ультрафіолетову експозицію та фотозахисну поведінку населення [24]. За умови анонімізації інформації вони можуть використовуватися для епідеміологічного моніторингу, оцінки ефективності профілактичних програм і планування заходів щодо зниження ризику розвитку злоякісних новоутворень шкіри.

Водночас ефективність мобільних застосунків залежить від достовірності вхідних даних, клінічної валідації алгоритмів, рівня цифрової грамотності користувачів, дотримання вимог щодо захисту персональних даних та інтеграції з національними електронними системами охорони здоров'я [25].

Штучний інтелект у стратифікації ризику та діагностичній підтримці злоякісних новоутворень шкіри. Штучний інтелект (Artificial Intelligence, AI) є одним із ключових інструментів сучасної цифрової медицини, що може використовуватися для стратифікації індивідуального ризику та підтримки діагностичних рішень щодо злоякісних новоутворень шкіри [26, 27].

На відміну від традиційних статистичних моделей, алгоритми машинного навчання (Machine Learning, ML) та глибокого навчання (Deep Learning, DL) здатні одночасно аналізувати велику кількість взаємопов'язаних факторів ризику, виявляти приховані закономірності та динамічно оновлювати прогностичні моделі [28].

Основою прогнозування є інтеграція інформації, отриманої від різних цифрових джерел. Алгоритми аналізують індивідуальну ультрафіолетову експозицію, зареєстровану wearable UV sensors, дані мобільних застосунків про поведінку користувача, фототип шкіри, вік, стать, професійну діяльність, анамнез сонячних опіків, кількість меланоцитарних невусів, сімейний анамнез злоякісних новоутворень шкіри, результати цифрової дерматоскопії, а також показники навколишнього середовища, зокрема ультрафіолетовий індекс, географічне розташування та погодні умови [29].

На основі комплексного аналізу цих параметрів алгоритми формують індивідуальний профіль ризику, визначають ймовірність накопичення канцерогенної дози ультрафіолетового випромінювання та прогнозують потребу в проведенні профілактичних заходів [27]. На відміну від статичних моделей оцінки ризику, сучасні AI-системи постійно оновлюють результати прогнозування відповідно до змін ультрафіолетової експозиції, поведінки користувача та факторів довкілля, забезпечуючи динамічне управління ризиком.

Практичне значення штучного інтелекту полягає у підтримці прийняття клінічних і профілактичних рішень [13, 30]. На основі прогнозованого рівня ризику система може автоматично рекомендувати оптимальний режим фотозахисту, визначати доцільність проведення дерматоскопічного обстеження, рекомендувати консультацію лікаря-дерматолога або збільшення частоти динамічного спостереження [26]. Такий підхід дозволяє персоналізувати профілактичні заходи відповідно до індивідуальних особливостей кожної людини.

У системі громадського здоров'я алгоритми штучного інтелекту можуть використовуватися для аналізу популяційних даних, прогнозування територіального ризику розвитку злоякісних новоутворень шкіри та оцінки ефективності профілактичних програм. Поєднання інформації про ультрафіолетову експозицію населення, кліматичні фактори, професійну структуру регіону та показники захворюваності створює можливість визначення груп підвищеного ризику, оптимізації програм дерматоскопічного скринінгу та більш раціонального розподілу ресурсів системи охорони здоров'я [27].

Разом із значними перспективами широке впровадження штучного інтелекту потребує клінічної валідації прогностичних моделей, стандартизації алгоритмів, забезпечення ре-

презентативності навчальних вибірок, прозорості процесу прийняття рішень та надійного захисту персональних медичних даних [31, 32].

Подальший розвиток AI-технологій пов'язують зі створенням інтегрованих цифрових платформ, які поєднуюватимуть інформацію про індивідуальну ультрафіолетову експозицію, клінічні характеристики пацієнта, цифрову дерматоскопію та електронні медичні записи, забезпечуючи перехід до проактивної, ризикорієнтованої моделі профілактики злоякісних новоутворень шкіри.

Теледерматологія як інструмент використання результатів цифрового моніторингу в клінічній практиці та громадському здоров'ї. Теледерматологія є завершальним етапом сучасної цифрової моделі профілактики злоякісних новоутворень шкіри, забезпечуючи практичне використання результатів моніторингу ультрафіолетової експозиції, цифрової дерматоскопії та алгоритмів прогнозування ризику [12, 33]. На відміну від інших цифрових технологій, її основною функцією є дистанційна клінічна оцінка отриманої інформації, прийняття лікарських рішень і визначення подальшої тактики ведення пацієнта.

Сучасні теледерматологічні платформи забезпечують передачу клінічних фотографій, цифрових дерматоскопічних зображень та іншої медичної інформації за моделями store-and-forward, синхронних відеоконсультацій або гібридного консультування [34]. Це дозволяє лікарю оцінити морфологічні особливості новоутворення, порівняти його зі збереженими зображеннями у динаміці та визначити необхідність додаткового обстеження або направлення до спеціалізованого закладу [12].

Особливу цінність теледерматологія має за умови інтеграції з іншими цифровими технологіями [35]. Поряд із клінічними та дерматоскопічними зображеннями лікар отримує інформацію про індивідуальну ультрафіолетову експозицію, накопичену дозу опромінення, фототип шкіри, професійну діяльність, результати оцінки ризику, сформовані алгоритмами штучного інтелекту, а також дані про дотримання рекомендацій щодо фотозахисту [36]. Комплексний аналіз цих показників дозволяє об'єктивніше оцінити індивідуальний ризик, визначити оптимальну частоту контрольних оглядів та сформувати персоналізований план профілактичного спостереження [33].

У клінічній практиці теледерматологія сприяє ранньому виявленню злоякісних ново-

утворень шкіри, скороченню часу від появи підозрілих змін до консультації спеціаліста та оптимізації маршрутизації пацієнтів. Особливе значення вона має для осіб із підвищеним ризиком розвитку раку шкіри, зокрема працівників, діяльність яких пов'язана з тривалою професійною ультрафіолетовою експозицією, пацієнтів із численними меланоцитарними невусами, обтяженим сімейним анамнезом або перенесеними злоякісними новоутвореннями шкіри [12].

У системі громадського здоров'я теледерматологія створює можливості для масштабування програм раннього виявлення раку шкіри, забезпечує доступність спеціалізованої допомоги незалежно від місця проживання пацієнта та сприяє більш ефективному використанню кадрових і матеріально-технічних ресурсів [33]. Інтеграція теледерматологічних сервісів з електронними медичними записами дозволяє накопичувати стандартизовані клінічні дані, здійснювати епідеміологічний моніторинг, оцінювати ефективність профілактичних програм та підтримувати прийняття управлінських рішень у сфері громадського здоров'я [31].

Водночас ефективність теледерматології залежить від якості цифрових зображень, стандартизації протоколів обстеження, технічної сумісності інформаційних систем, забезпечення інформаційної безпеки та дотримання вимог щодо захисту персональних медичних даних [32]. Подальший розвиток цього напрямку пов'язують зі створенням єдиних цифрових платформ, які поєднуюватимуть результати моніторингу ультрафіолетової експозиції, цифрової дерматоскопії, алгоритмів штучного інтелекту та електронних медичних записів, забезпечуючи безперервний профілактичний супровід пацієнтів і підвищуючи ефективність програм профілактики злоякісних новоутворень шкіри [35].

Порівняльна ефективність традиційних і цифрових підходів до оцінки УФ-експозиції та ризику раку шкіри. Традиційний моніторинг сонячного ультрафіолетового випромінювання переважно ґрунтується на визначенні УФ-індексу та інших параметрів навколишнього середовища. УФ-індекс має важливе популяційне значення, оскільки стандартизовано характеризує потенційну небезпеку еритемної УФ-радіації у визначеному місці й часі та є основою для формування рекомендацій щодо фотозахисту [2]. Водночас його використання

як індивідуального показника експозиції має принципові обмеження: УФ-індекс характеризує зовнішнє середовище, але не визначає фактичну дозу випромінювання, отриману конкретною людиною [10]. Персональна УФ-доза залежить від тривалості перебування просто неба, положення тіла, локалізації сенсора або відкритої ділянки шкіри, використання одягу, головних уборів, перебування в тіні, застосування сонцезахисних засобів, професійної активності та поведінкових факторів. Тому однаковий рівень зовнішнього ультрафіолетового випромінювання не обов'язково відповідає однаковій індивідуальній експозиції до УФ-випромінювання [10].

Самооцінка перебування на сонці додатково характеризується ризиком похибки пам'яті та неточністю оцінки тривалості й інтенсивності експозиції [10].

Персональні УФ-дозиметри та wearable UV sensors частково усувають цю невідповідність, оскільки реєструють випромінювання безпосередньо в зоні перебування користувача протягом визначеного часу. Їх принципова перевага над УФ-індексом полягає, таким чином, не в заміні стандартизованого моніторингу довкілля, а у переході від характеристики потенційної територіальної небезпеки до оцінки персональної експозиції [10].

Інтеграція результатів персональної дозиметрії з даними про фототип, анамнез сонячних опіків, професійну експозицію, кількість невусів та інші фактори ризику створює передумови для більш диференційованої стратифікації ризику [10].

Окремий рівень доказовості стосується цифрових профілактичних втручань. У рандомізованому контрольованому дослідженні за участю 1369 молодих дорослих дві активні цифрові програми профілактики раку шкіри забезпечили статистично значуще покращення загальної фотозахисної поведінки порівняно з електронним інформаційним буклетом [11].

Розмір ефекту становив Cohen's $d = 0,209$ для базової та $d = 0,376$ для розширеної цифрової програми; розширена програма також перевищувала базову за показником фотозахисту ($d = 0,149$). Водночас відмінності щодо фактичної УФ-експозиції не досягли статистичної значущості [11].

Ці результати свідчать, що доказова перевага цифрових втручань на сучасному етапі найбільш переконливо продемонстрована щодо модифікації профілактичної поведінки, а не

безпосереднього зниження захворюваності на рак шкіри [11].

Інший рівень цифровізації пов'язаний із застосуванням штучного інтелекту для аналізу шкірних новоутворень. За результатами систематичного огляду та метааналізу, що включав 53 дослідження, з яких 19 увійшли до кількісного синтезу, алгоритми штучного інтелекту продемонстрували сумарну чутливість 87,0% і специфічність 77,1% при діагностиці раку шкіри, тоді як для клініцистів загалом відповідні показники становили 79,8% та 73,6%.

Порівняно з лікарями загальної практики відмінності були більш вираженими: чутливість і специфічність AI становили 92,5% та 66,5% відповідно, тоді як у лікарів загальної практики — 64,6% та 72,8%. Порівняно з експертами-дерматологами різниця була менш вираженою: чутливість/специфічність AI становили 86,3/78,4%, а експертів — 84,2/74,4% [37].

Таким чином, найбільш обґрунтованою моделлю клінічного застосування AI є не автономна заміна лікаря, а підтримка прийняття клінічних рішень. Автори метааналізу також наголошують на необхідності подальших досліджень у реальних клінічних умовах та оцінки моделей AI-assisted diagnosis [37].

Наявні дані водночас не дозволяють стверджувати, що використання персональних УФ-сенсорів, мобільних застосунків або алгоритмів штучного інтелекту саме по собі вже доведе-

но знижує довгострокову захворюваність або смертність від раку шкіри порівняно з традиційним моніторингом УФ-індексу [10, 11, 37].

Узагальнені порівняльні характеристики традиційних і цифрових підходів до оцінки УФ-експозиції, модифікації профілактичної поведінки та підтримки оцінки ризику злоякісних новоутворень шкіри наведено в *табл. 1*.

Наведене порівняння демонструє, що цифрові технології не є прямою альтернативою традиційному моніторингу УФ-випромінювання, оскільки окремі методи характеризують різні рівні профілактичного та клінічного процесу. УФ-індекс і метеорологічний або супутниковий моніторинг забезпечують оцінку потенційної небезпеки на популяційному рівні, персональні УФ-сенсори — індивідуальної експозиції, mHealth-технології — поведінкових і профілактичних параметрів, тоді як алгоритми штучного інтелекту та теледерматологія орієнтовані переважно на стратифікацію ризику, підтримку діагностичних рішень і маршрутизацію пацієнтів. Це обґрунтовує доцільність їх інтегрованого застосування залежно від конкретного профілактичного або клінічного завдання.

Недоліки та обмеження цифрових технологій. Попри значний потенціал цифрових технологій для персоналізації моніторингу ультрафіолетової експозиції, модифікації фотозахисної поведінки та підтримки раннього виявлення злоякісних новоутворень шкіри,

Таблиця 1. Порівняльна характеристика підходів до оцінки УФ-експозиції та ризику раку шкіри

Метод	Об'єкт оцінки	Основна перевага	Основне обмеження	Рівень застосування
УФ-індекс	Потенційна еритемна УФ-небезпека	Стандартизована оцінка УФ-небезпеки	Не визначає персональну дозу	Популяційний
Наземний/супутниковий моніторинг	УФ-випромінювання довкілля	Територіальне охоплення	Не відображає індивідуальну експозицію	Популяційний
Самооцінка	Сонячна експозиція	Простота та доступність	Похибки пам'яті	Індивідуальний
Персональні УФ-сенсори	Індивідуальна УФ-експозиція	Персональна дозиметрія	Калібрування та положення сенсора	Індивідуальний/професійний
mHealth	Експозиція та поведінкові фактори	Персоналізація профілактики	Якість даних і цифрова нерівність	Індивідуальний
Штучний інтелект	Фактори ризику та зображення	Стратифікація ризику й підтримка рішень	Алгоритмічне зміщення та валідація	Клінічний
Теледерматологія	Клінічні та дерматоскопічні дані	Дистанційна оцінка та маршрутизація	Якість зображень і технічні обмеження	Клінічний

їх практичне застосування супроводжується технічними, клінічними, організаційними, соціальними та етико-правовими обмеженнями. Ці фактори мають принципове значення при оцінці можливості інтеграції цифрових інструментів у програми профілактики раку шкіри та систему громадського здоров'я.

Технічні обмеження. Однією з основних проблем персональних УФ-сенсорів і носимих дозиметрів залишається неоднорідність їх технічних характеристик. Пристрої відрізняються спектральною чутливістю, діапазоном вимірювання, способом перетворення та реєстрації сигналу, точністю, стабільністю показників і алгоритмами розрахунку кумулятивної експозиції. Результат персональної дозиметрії також залежить від локалізації та орієнтації сенсора відносно джерела випромінювання, положення тіла, затінення одягом або іншими об'єктами та умов навколишнього середовища. Відповідно, локально зареєстрована сенсором доза не завжди може безпосередньо екстраполюватися на загальну УФ-експозицію поверхні шкіри. Відмінності між пристроями та недостатня стандартизація протоколів вимірювання додатково обмежують порівнянність результатів різних досліджень [10].

Для мобільних і носимих систем додаткове значення мають автономність роботи, енергоспоживання, стабільність бездротового передавання даних та сумісність із різними мобільними платформами. Тому технічна можливість безперервного моніторингу сама по собі не гарантує однакової точності та відтворюваності персональної УФ-дозиметрії в реальних умовах використання [17, 18].

Клінічні обмеження. Важливим методологічним обмеженням є відмінність між точністю вимірювання УФ-експозиції та доказовістю клінічної ефективності цифрового втручання. Більш детальна реєстрація персональної УФ-دوزи не означає автоматичного зниження ризику злоякісних новоутворень шкіри. Для підтвердження такого ефекту необхідні довготривалі проспективні дослідження з клінічно значущими кінцевими точками. Наявні дослідження цифрових профілактичних втручань переважно оцінюють зміни фотозахисної поведінки, використання сонцезахисних засобів, уникнення надмірної сонячної експозиції та інші проміжні результати.

Зокрема, у рандомізованому контрольованому дослідженні цифрових втручань серед 1369 молодих дорослих було продемонстровано

статистично значуще покращення низки показників фотозахисної поведінки, однак відмінності щодо фактичної УФ-експозиції не досягли статистичної значущості. Таким чином, наявні результати не слід екстраполювати на доведене зниження захворюваності або смертності від раку шкіри [11].

Обмеження алгоритмів штучного інтелекту. Для AI-систем у дерматології ключовими проблемами залишаються репрезентативність навчальних вибірок, зовнішня валідація, алгоритмічне зміщення та можливе зниження діагностичної ефективності при перенесенні моделі на популяції або клінічні умови, які відрізняються від даних, використаних під час її розробки. Результати алгоритму можуть залежати від характеристик зображення, типу пристрою, умов освітлення, способу отримання дерматоскопічного зображення, представленості різних фототипів шкіри та структури патології у навчальному наборі даних [13, 26].

Окремою проблемою є можливість хибно-позитивних і хибнонегативних результатів. Хибнопозитивний результат може збільшувати кількість необґрунтованих консультацій, дерматоскопічних досліджень або біопсій, тоді як хибнонегативний результат потенційно створює ризик затримки діагностики злоякісного новоутворення. Навіть за умов високої діагностичної точності AI його результати не є абсолютними. За даними систематичного огляду та метааналізу, сумарні показники чутливості та специфічності AI при діагностиці раку шкіри становили 87,0% і 77,1% відповідно, що підтверджує необхідність клінічної інтерпретації результатів і збереження лікарського контролю [37].

Суттєвим обмеженням залишається також недостатня пояснюваність частини моделей машинного та глибокого навчання. Неможливість чітко визначити, які ознаки стали визначальними для конкретного автоматизованого висновку, ускладнює перевірку результату лікарем, оцінку причин помилки та формування довіри до системи. У зв'язку з цим клінічно доцільним є використання AI насамперед як інструменту підтримки прийняття рішень, а не автономної заміни клінічної оцінки [32].

Обмеження теледерматології. Ефективність дистанційної оцінки шкірних новоутворень значною мірою залежить від якості клінічних і дерматоскопічних зображень, повноти анамнестичної інформації, технічних характеристик обладнання та досвіду фахівця,

який проводить дистанційну інтерпретацію. Недостатня якість фотографій, невідповідне освітлення, відсутність стандартизованої візуалізації або неповні клінічні дані можуть знижувати діагностичну цінність дистанційного обстеження. Крім того, теледерматологія не в усіх випадках може замінити очний огляд, пальпацію, повне обстеження шкірного покриву та гістопатологічну верифікацію підозрілих утворень [12, 33, 34].

Організаційні та економічні обмеження. Широке впровадження цифрового УФ-моніторингу потребує не лише придбання сенсорів або програмного забезпечення, але й створення інфраструктури для збирання, передавання, зберігання та клінічної інтерпретації даних. Практичними бар'єрами можуть бути вартість обладнання, технічне обслуговування, необхідність навчання медичних працівників, відсутність уніфікованих форматів даних та недостатня інтероперабельність між мобільними застосунками, носимими пристроями й електронними системами охорони здоров'я. Особливого значення набуває визначення того, які цифрові показники мають клінічну цінність і повинні інтегруватися в електронний медичний запис, щоб збільшення обсягу даних не призводило до додаткового інформаційного навантаження на медичного працівника.

Соціальні обмеження. Результативність цифрових технологій залежить від прихильності користувача до регулярного використання пристрою або мобільного застосунку. Нерегулярне носіння сенсора, відключення пристрою, неповне внесення інформації та припинення використання застосунку можуть призводити до формування неповних часових рядів і знижувати цінність персонального моніторингу. Крім того, нерівний доступ до смартфонів, носимих пристроїв і стабільного інтернет-з'єднання, а також відмінності цифрової грамотності можуть формувати «цифровий розрив» і обмежувати доступність таких технологій для окремих соціальних та вікових груп [32].

Етичні та правові обмеження. Збирання великих масивів персональних даних про поведінку користувача, географічні характеристики експозиції, фотографії та дерматоскопічні зображення шкіри створює додаткові вимоги до конфіденційності, захисту даних і кібербезпеки. Принципового значення набувають визначення правових підстав для обробки та вторинного використання медичних даних, контроль доступу до них, прозорість алгоритмічної

обробки та встановлення відповідальності за рішення, прийняті із застосуванням автоматизованих систем.

ВООЗ визначає захист автономії людини, безпеку, прозорість і пояснюваність алгоритмів, відповідальність, інклюзивність та справедливість як базові принципи належного використання AI у сфері охорони здоров'я. ВООЗ також наголошує на необхідності перевірки алгоритмів у тих умовах, у яких передбачається їх практичне використання, та оцінки можливих відмінностей ефективності між різними групами населення. Отже, клінічна інтеграція AI потребує не лише підтвердження діагностичної точності, але й відповідної системи управління, людського контролю та механізмів відповідальності [32].

Узагальнюючи, основним обмеженням сучасних цифрових технологій у профілактиці раку шкіри є розрив між високою технологічною здатністю до збирання й аналізу персоналізованих даних та обмеженою кількістю доказів щодо їх впливу на довгострокові клінічні кінцеві точки. Персональні УФ-сенсори підвищують деталізацію оцінки індивідуальної експозиції, mHealth-втручання можуть покращувати фотозахисну поведінку, а AI та теледерматологія розширюють можливості стратифікації ризику й дистанційної діагностичної підтримки. Проте ці переваги не усувають необхідності стандартизації, зовнішньої валідації, клінічного контролю, захисту персональних даних та оцінки ефективності в реальних умовах. Тому на сучасному етапі цифрові технології доцільно розглядати як доповнення до традиційних методів УФ-моніторингу, профілактики та дерматологічного спостереження, а не як їх повну заміну.

ВИСНОВКИ

1. Традиційні та цифрові підходи до моніторингу УФ-експозиції мають різні, але взаємодоповнювальні сфери застосування. УФ-індекс, наземний і супутниковий моніторинг забезпечують стандартизовану оцінку потенційної УФ-небезпеки на популяційному рівні, але не відображають фактичну індивідуальну дозу опромінення. Персональні УФ-дозиметри та носимі УФ-сенсори дають змогу персоналізувати оцінку експозиції, однак точність їх показників залежить від технічних характеристик, калібрування, локалізації та орієнтації сенсора, що визначає необхідність стандартизації методів персональної УФ-дозиметрії.

2. Цифрові та mHealth-втручання створюють додаткові можливості для персоналізованої профілактики шляхом поєднання даних про УФ-експозицію, індивідуальні фактори ризику та фотозахисну поведінку. Рандомізовані дослідження підтверджують їх здатність покращувати окремі показники фотозахисної поведінки, проте наявна доказова база не підтверджує безпосереднього зниження фактичної УФ-експозиції, захворюваності або смертності від злоякісних новоутворень шкіри. Тому поведінкові результати цифрових втручань не слід екстраполювати на доведений довгостроковий онкопревентивний ефект.

3. Найбільш переконливі кількісні докази ефективності цифрових технологій отримано для алгоритмів штучного інтелекту в діагностичній підтримці злоякісних новоутворень шкіри. За даними систематичного огляду та метааналізу, сумарна чутливість AI становила 87,0%, специфічність — 77,1% порівняно з 79,8% та 73,6% відповідно для клініцистів загалом; при порівнянні з експертами-дерматологами відмінності були меншими. Ці результати обґрунтовують використання AI як інструменту підтримки клінічних рішень і стратифікації ризику, однак алгоритмічне зміщення, недостатня зовнішня валідація та обмежена пояснюваність моделей не дозволяють розглядати його як автономну альтернативу клінічній і дерматоскопічній оцінці лікарем.

4. Теледерматологія та цифрова дерматоскопія можуть підвищувати доступність дистанційної оцінки шкірних новоутворень і оптимізувати маршрутизацію пацієнтів, проте їх діагностична ефективність визначається якістю та стандартизацією зображень, повнотою клінічної інформації, технічною інфраструктурою та кваліфікацією фахівця. За наявності відповідних клінічних показань дистанційні технології доповнюють, але не замінюють очне дерматологічне обстеження та гістопатологічну верифікацію.

5. Сукупність наявних доказів обґрунтовує інтегровану модель профілактики УФ-асоційованих злоякісних новоутворень шкіри, у якій традиційний УФ-моніторинг забезпечує оцінку популяційної небезпеки, персональна цифрова дозиметрія — індивідуальної експозиції, mHealth — підтримку модифікації фотозахисної поведінки, а AI і теледерматологія — стратифікацію ризику, діагностичну підтримку та маршрутизацію пацієнтів. Цифрові технології доцільно розглядати як доповнення, а не за-

міну традиційних профілактичних і клінічних підходів. Їх подальше впровадження потребує стандартизації, зовнішньої валідації, інтероперабельності, захисту персональних даних та проспективної оцінки впливу на клінічно значущі довгострокові результати.

REFERENCES

1. **Yang TT, Lan CE.** Photocarcinogenesis of the skin: current status and future trends. *Kaohsiung J Med Sci.* 2025;41(4). doi: <https://doi.org/10.1002/kjm2.12946>
2. World Health Organization. Ultraviolet radiation [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2022 [cited 2026 Sep 10]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ultraviolet-radiation>
3. International Agency for Research on Cancer. Global Cancer Observatory: Cancer Today. Melanoma of skin [Internet]. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2024 [cited 2026 Sep 10]. Available from: <https://gco.iarc.who.int/media/globocan/factsheets/cancers/16-melanoma-of-skin-fact-sheet.pdf>
4. **Arnold M, Singh D, Laversanne M, Vignat J, Vacarella S, Meheus F, et al.** Global burden of cutaneous melanoma in 2020 and projections to 2040. *JAMA Dermatol.* 2022;158(5):495–503. doi: <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2022.0160>
5. **Langselius O, Rungay H, de Vries E, Whiteman DC, Jemal A, Parkin DM, et al.** Global burden of cutaneous melanoma incidence attributable to ultraviolet radiation in 2022. *Int J Cancer.* 2025;157(6):1110–9. doi: <https://doi.org/10.1002/ijc.35463>
6. **Wang R, Chen Y, Shao X, Chen T, Zhong J, Ou Y, et al.** Burden of skin cancer in older adults from 1990 to 2021 and modelled projection to 2050. *JAMA Dermatol.* 2025;161(7):715–22. doi: <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2025.1276>
7. Ministry of Health of Ukraine. Melanoma: chomu vazhlyvo buty uvazhnymy do rodymok? [Melanoma: why it is important to pay attention to moles] [Internet]. Kyiv: Ministry of Health of Ukraine; 2024 May 11 [cited 2026 Sep 10]. Ukrainian. Available from: <https://moz.gov.ua/uk/melanoma-chomu-vazhlyvo-buty-uvazhnyimi-do-rodymok>
8. **Carvalho F, Strehl C, Barroso-Dias J, Castela MM, Gobba F, Lapão LV, et al.** Occupational exposure to solar ultraviolet radiation among outdoor workers in Lisbon, 2023 — first results of the MEAOW study. *Front Public Health.* 2025;13:1659663. doi: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1659663>
9. World Health Organization. Raising awareness on ultraviolet radiation [Internet]. Geneva: World Health Organization; [cited 2026 Jul 5]. Available from: <https://www.who.int/activities/raising-awareness-on-ultraviolet-radiation>
10. **Huang X, Chalmers AN.** Review of wearable and portable sensors for monitoring personal solar UV exposure. *Ann Biomed Eng.* 2021;49(3):964–78. doi: <https://doi.org/10.1007/s10439-020-02710-x>
11. **Heckman CJ, Mitarotondo A, Lin Y, Khavjou O, Riley M, Manne SL, et al.** Digital interventions to modify skin cancer risk behaviors in a national sample

- of young adults: randomized controlled trial. *J Med Internet Res*. 2024;26.
doi: <https://doi.org/10.2196/55831>
12. **López-Pardo Rico M, Ginarte Val M, Sánchez-Aguilar Rojas MD, Martínez Leboráns L, Rodríguez Otero C, Flórez Á.** Teledermatology vs. face-to-face dermatology for the diagnosis of melanoma: a systematic review. *Cancers* (Basel). 2025;17(17):2836.
doi: <https://doi.org/10.3390/cancers17172836>
 13. **Wei ML, Tada M, So A, Torres R.** Artificial intelligence and skin cancer. *Front Med* (Lausanne). 2024; 11:1331895.
doi: <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1331895>
 14. **Baethge C, Goldbeck-Wood S, Mertens S.** SANRA — a scale for the quality assessment of narrative review articles. *Res Integr Peer Rev*. 2019;4:5.
doi: <https://doi.org/10.1186/s41073-019-0064-8>
 15. **Lin C, Du Y, Pendse N, Fernandes G, Alshurafa N, Pedram M.** Self-sustaining wearable UV sensor for passive and continuous sun protection. In: *2024 IEEE 20th International Conference on Body Sensor Networks (BSN)*; 2024 Oct 15–17; Chicago, IL, USA. Piscataway (NJ): IEEE; 2024. p. 1–4.
doi: <https://doi.org/10.1109/BSN63547.2024.10780588>
 16. **Fraser K, Li V, Sobotka M, Vinagolu-Baur J, Herriek G.** The role of wearable technology in real-time skin health monitoring. *JEADV Clin Pract*. 2025;4(1): 21–29.
doi: <https://doi.org/10.1002/jvc2.587>
 17. **Cheng J, Xue N, Zhou W, Qin B, Qiu B, Fang G, et al.** Recent progress in flexible wearable sensors for real-time health monitoring: materials, devices, and system integration. *Micromachines* (Basel). 2025; 16(10):1124.
doi: <https://doi.org/10.3390/mi16101124>
 18. **Kong L, Li W, Zhang T, Ma H, Cao Y, Wang K, et al.** Wireless technologies in flexible and wearable sensing: from materials design, system integration to applications. *Adv Mater*. 2024;36(27).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202400333>
 19. Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance. Wearable UV sensors for use during work performed outdoors. Focus on IFA's work No. 0442 [Internet]. Sankt Augustin: German Social Accident Insurance; 2024 [cited 2026 Jul 5]. 2 p. Available from: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/5060>
 20. **Sangers TE, Wakkee M, Moolenburgh F, Nijsten T, Lugtenberg M.** Mobile health apps for skin cancer triage in the general population: a qualitative study on healthcare providers' perspectives. *BMC Cancer*. 2025;25(1):851.
doi: <https://doi.org/10.1186/s12885-025-14244-3>
 21. **Clare IM, Gamag N, Alvares GA, Black LJ, Francis J, Jaimangal M, et al.** The effects of using the Sun Safe app on sun health knowledge and behaviors of young teenagers: results of pilot intervention studies. *JMIR Dermatol*. 2022;5(1).
doi: <https://doi.org/10.2196/35137>
 22. **Habgood E, McCormack C, Walter FM, Emery JD.** Patients' experiences of using skin self-monitoring apps with people at higher risk of melanoma: qualitative study. *JMIR Dermatol*. 2021;4(2).
doi: <https://doi.org/10.2196/22583>
 23. **Drabarek D, Habgood E, Janda M, Hersch J, Ackermann D, Low D, et al.** Experiences of patient-led surveillance, including patient-performed teledermoscopy, in the MEL-SELF pilot randomized controlled trial: qualitative interview study. *JMIR Dermatol*. 2022;5(3).
doi: <https://doi.org/10.2196/35916>
 24. **Gençoğlu Ş.** Analysis of skin health management through telemedicine and mobile health in dermatology in the post-COVID era. *Eur Res J*. 2025;11(1):113–22.
doi: <https://doi.org/10.18621/eurj.1470960>
 25. **Mukherjee S, Rao SR, Poddar A.** Artificial intelligence powered mobile health apps for skin cancer detection: current challenges and a systems thinking approach for improved public health outcomes in low- and middle-income countries. *Melanoma Res*. 2026;36(1):16–30.
doi: <https://doi.org/10.1097/CMR.0000000000001074>
 26. **Górecki S, Tatka A, Brusey J.** Artificial intelligence and new technologies in melanoma diagnosis: a narrative review. *Cancers* (Basel). 2025;17(24):3896.
doi: <https://doi.org/10.3390/cancers17243896>
 27. **Karnwal A, Selvaraj M, Kumar G, Kumar A, Al-Tawaha ARMS, Aqueel-Ur-Rehman, et al.** Multimodal artificial intelligence for enhanced skin cancer diagnosis and prognosis. *Discov Oncol*. 2026;17(1):515.
doi: <https://doi.org/10.1007/s12672-026-04532-0>
 28. **Zareen SS, Hossain MS, Wang J, Kang Y.** Recent innovations in machine learning for skin cancer lesion analysis and classification: a comprehensive analysis of computer-aided diagnosis. *Precis Med Sci*. 2025;14(1):15–40.
doi: <https://doi.org/10.1002/prm2.12156>
 29. **Zhai P, Xu W, Duan G, Wu Y, Qi M, Chang L, et al.** Artificial intelligence-integrated wearable biomedical devices for cancer management. *J Natl Cancer Cent*. 2025;5(6):561–76.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jncc.2025.09.001>
 30. **Behara K, Bhero E, Agee JT.** AI in dermatology: a comprehensive review into skin cancer detection. *PeerJ Comput Sci*. 2024;10.
doi: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2530>
 31. European Commission. European Health Data Space Regulation (EHDS) [Internet]. Brussels: European Commission; 2025 [cited 2026 Jul 5]. Available from: https://health.ec.europa.eu/ehealth-digital-health-and-care/european-health-data-space-regulation-ehds_en
 32. World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2021 [cited 2026 Jul 5]. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240029200>
 33. **Mederle AL, Fericean RM, Grigore R, Badea MA, Bara MA, Ilie AC.** Teledermatology and teledermoscopy for melanoma care pathways: timeliness, diagnostic performance, and stage at diagnosis: a systematic review. *Diagnostics* (Basel). 2025;15(23):3003.
doi: <https://doi.org/10.3390/diagnostics15233003>
 34. **Jones LK, Oakley A.** Store-and-forward teledermatology for assessing skin cancer in 2023: literature review. *JMIR Dermatol*. 2023;6.
doi: <https://doi.org/10.2196/43395>
 35. **Giansanti D.** The artificial intelligence in teledermatology: a narrative review on opportunities, pers-

pectives, and bottlenecks. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(10):5810.

doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph20105810>

36. **Shen CZ, Zhao AT, Rotemberg V, Daneshjou R, Parker ER, Rosenbach M.** Artificial intelligence in dermatology: clinical promise and environmental impact. *J Invest Dermatol*. 2026 Jun 10(26)01043-2. [Online ahead of print].

doi: <https://doi.org/10.1016/j.jid.2026.03.039>

37. **Salinas MP, Sepúlveda J, Hidalgo L, Peirano D, Morrel M, Uribe P, et al.** A systematic review and meta-analysis of artificial intelligence versus clinicians for skin cancer diagnosis. *NPJ Digit Med*. 2024;7(1):125.

doi: <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01103-x>

ФІНАНСУВАННЯ

Дослідження виконано без зовнішнього фінансування. Автор не отримував грантів чи іншої фінансової підтримки від державних, громадських або комерційних організацій.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Під час підготовки рукопису генеративний штучний інтелект не використовувався.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА ТА ЙОГО ВНЕСОК

КОВТУН Лариса: концептуалізація, методологія, дослідження, збір та аналіз наукових джерел, формальний аналіз, інтерпретація результатів, написання оригінального рукопису, перегляд і редагування тексту, візуалізація, адміністрування проєкту.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6596-9221>

e-mail: larysakovtun1972@gmail.com

Отримано: 16.07.2026

Прийнято до друку: 17.09.2026

Опубліковано: 30.09.2026

FUNDING

The research was carried out without external financial support. The author did not receive any grants or other financial support from governmental, public, or commercial organizations.

CONFLICTS OF INTEREST

The author declares no conflict of interest.

USE OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

No generative artificial intelligence was used in the preparation of this manuscript.

AUTHOR INFORMATION AND CONTRIBUTIONS

KOVTUN Larysa: conceptualization, methodology, investigation, literature search and analysis, formal analysis, interpretation of the results, writing of the original draft, review and editing of the manuscript, visualization, and project administration.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6596-9221>

e-mail: larysakovtun1972@gmail.com

Received: 16.07.2026

Accepted: 17.09.2026

Published: 30.09.2026

