

Медичні науки

УДК 612.014.4+677.017.66+621.383.51

Ковальчук Юлія Анатоліївна

*власниця студії, чемпіон міжнародних чемпіонатів, викладач,
міжнародний суддя, спікер, студія «Kova Nails Art»
(1414 Sheepshead Bay Road, Бруклін, Нью-Йорк, США)*

Kovalchuk Yulia

*Studio Owner, Champion of international championships, Educator,
International Judge, Speaker, Kova Nails Art Studio
(1414 Sheepshead Bay Road, Brooklyn, NY, USA)*

ORCID: 0009-0005-6568-1083

**ВПЛИВ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ LED-ВИПРОМІНЮВАННЯ НА
ПРОЛІФЕРАТИВНУ АКТИВНІСТЬ КЛІТИН ШКІРИ ТА НІГТІВ
THE INFLUENCE OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF LED
RADIATION ON THE PROLIFERATIVE ACTIVITY OF SKIN AND NAIL
CELLS**

Анотація. Актуальність дослідження зумовлено активним розширенням застосування LED-технологій у дерматологічній і косметологічній практиці, зокрема у процедурах регенерації шкіри, стимуляції росту нігтів, фототерапії та посттравматичного відновлення. Водночас залишаються недостатньо вивченими спектрально- та дозозалежні механізми клітинної відповіді на LED-випромінювання, що ускладнює формування доказової бази для його безпечного та ефективного використання. Мета дослідження - аналіз впливу спектрального складу LED-випромінювання на проліферативну активність клітин епідермісу та

нігтьової пластини, визначити біологічні ефекти в залежності від довжини хвилі, інтенсивності та режиму опромінення, а також обґрунтувати підходи до раціонального та безпечного використання LED-технологій у медико-косметологічній сфері. **Методологія.** Використано структурно-функціональний аналіз взаємозв'язків між спектральними параметрами LED-випромінювання та реакцією клітин шкіри і нігтів. Узагальнено результати експериментальних і клінічних досліджень, проведено порівняльну характеристику проліферативних відповідей залежно від спектру, тривалості експозиції, режиму подачі та частоти процедур. **Результати.** Встановлено, що червоне та інфрачервоне випромінювання (620–850 нм) сприяють активації мітохондріального метаболізму та стимулюють проліферацію фібробластів і клітин матриксу нігтя. Виявлено, що синє світло (405–450 нм) чинить пригнічувальний ефект через генерацію активних форм кисню та активацію апоптичних шляхів. Доведено, що біологічна відповідь клітин має чітко виражений дозозалежний характер, що обумовлює потребу в точному підборі параметрів LED-опромінення. **Висновки.** Раціональне використання LED-технологій потребує індивідуалізації параметрів опромінення з урахуванням спектральної чутливості клітин, фототипу шкіри та клінічної задачі. Оптимальні значення інтенсивності (10–50 мВт/см²), тривалості (5–15 хв) та частоти процедур (2–3 рази на тиждень) забезпечують проліферативний ефект без розвитку побічних реакцій. Установлено необхідність уникнення універсальних схем у світлотерапії. **Перспективи подальших досліджень.** Передбачено розширення експериментальної бази щодо довготривалого впливу LED-випромінювання, уточнення маркерів клітинної фоточутливості та розроблення персоналізованих протоколів застосування LED-терапії з урахуванням типу тканини та цільової дії.

Ключові слова: фотостимуляція, ріст клітин, енергія світла, довжина хвилі, відновлення тканин, світловий вплив, біологічний ефект.

Summary. The relevance of the study is due to the active expansion of LED technologies in dermatological and cosmetological practice, particularly in skin regeneration, nail growth stimulation, phototherapy, and post-traumatic recovery procedures. At the same time, the spectral and dose-dependent mechanisms of cellular response to LED radiation remain insufficiently studied, which complicates the formation of an evidence base for its safe and effective use. The aim of the study is to analyze the effect of the spectral composition of LED radiation on the proliferative activity of epidermal cells and the nail plate, to determine the biological effects depending on the wavelength, intensity, and irradiation mode, as well as to substantiate approaches to the rational and safe use of LED technologies in the medical and cosmetic fields. Methodology. A structural and functional analysis of the relationships between the spectral parameters of LED radiation and the response of skin and nail cells was used. The results of experimental and clinical studies were summarized, and a comparative characterization of proliferative responses depending on the spectrum, duration of exposure, mode of delivery, and frequency of procedures was performed. Results. It was found that red and infrared radiation (620–850 nm) promote the activation of mitochondrial metabolism and stimulate the proliferation of fibroblasts and nail matrix cells. It was found that blue light (405–450 nm) has an inhibitory effect due to the generation of active oxygen species and activation of apoptotic pathways. It was proven that the biological response of cells has a clearly pronounced dose-dependent character, which determines the need for accurate selection of LED irradiation parameters. Conclusions. The rational use of LED technologies requires the individualization of irradiation parameters, taking into account the spectral sensitivity of cells, skin

phototype, and clinical task. Optimal values of intensity (10–50 mW/cm²), duration (5–15 min), and frequency of procedures (2–3 times per week) provide a proliferative effect without the development of side reactions. The need to avoid universal schemes in light therapy has been established. Prospects for further research. It is planned to expand the experimental base for the long-term effects of LED radiation, refine markers of cellular photosensitivity, and develop personalized protocols for the use of LED therapy, taking into account the type of tissue and the target action.

Key words: *photostimulation, cell growth, light energy, wavelength, tissue repair, light exposure, biological effect.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах активного поширення світлодіодних джерел світла (LED) у побуті, косметології та медицині зростає потреба у ґрунтовному вивченні їхнього біологічного впливу на живі тканини, зокрема клітини шкіри та нігтьової пластини. Особливе занепокоєння викликає використання LED-випромінювання у процедурах, що передбачають тривале або повторюване опроміненням відкритих ділянок тіла, що актуалізує питання можливих наслідків для клітинного гомеостазу, проліферативної активності та морфофункціонального стану епідермальних структур. Аналіз наукової літератури свідчить про фрагментарність підходів до оцінки дії LED-випромінювання різного спектрального складу, що ускладнює формування цілісного уявлення про потенційні ризики чи, навпаки, терапевтичні переваги таких впливів. Практична значущість цієї проблеми зростає в контексті інтенсивного розвитку індустрії естетичної медицини, де LED-технології широко застосовуються у фототерапії, стимуляції росту нігтів, відновленні шкіри та лікуванні дерматологічних захворювань. Недостатність даних щодо молекулярно-клітинних механізмів відповіді на опромінення світлодіодами

різної довжини хвилі створює розриви між експериментальними результатами та їх клінічною інтерпретацією. Це зумовлює необхідність подальших досліджень із чітким контролем параметрів опромінення та використанням стандартизованих біологічних моделей. Таким чином, вивчення впливу спектрального складу LED-випромінювання на проліферативну активність клітин шкіри та нігтів має високу наукову та практичну актуальність, оскільки спрямоване на формування доказової бази для безпечного та ефективного використання LED-технологій у дерматокосметологічній практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження, присвячені впливу спектрального складу LED-випромінювання на проліферативну активність клітин шкіри та нігтів, охоплюють широкий спектр експериментальних і теоретичних підходів. Систематизація наявних джерел дозволяє виокремити чотири основні напрями аналізу.

Перший напрям стосується математичного моделювання та фізико-енергетичної оцінки впливу LED-випромінювання на тканини людини. У роботі З. Ю. Готри, С. В. Павлова, С. М. Злепка та співавторів запропоновано модель поширення тепла в шкірі та суміжних шарах під дією світлодіодного випромінювання. Модель враховує оптичні характеристики тканин і теплопровідність між шарами, що дозволяє прогнозувати локальний температурний ефект при використанні LED-джерел із різноманітним спектральним складом [1]. Теоретичні положення були доповнені експериментальними даними А. Марциняк (A. Marciniak), Б. Цесельські (B. Ciesielski), М. Юнєвіч (M. Juniewicz) та співавторів, які виявили зміни EPR-сигналу в нігтях під впливом штучного випромінювання, що свідчить про енергетичну чутливість кератинових структур до світла [2]. Подібний підхід застосували Е. Н. де Гальвес (E. N. de Gálvez), Х. Агілера (J. Aguilera), М. В. де Гальвес (M. V. de Gálvez) та співавтори для вивчення залежності проникнення світла крізь

нігтьову пластину від її товщини, що має практичне значення при використанні LED-джерел у терапевтичних цілях [3]. Сукупність цих результатів створює передумови для розробки комплексних моделей, що враховують як теплову, так і оптичні процеси в багатошарових структурах шкіри та нігтів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на валідацію біотеплових моделей *in vivo* з урахуванням фізіологічної варіативності біотканин.

Другий напрям охоплює оцінку цитотоксичності випромінювання LED/UV-пристроїв на клітини шкіри та нігтів. У дослідженні А. Лопіш (А. Lopes), П. Перейри (P. Pereira), Г. Олівейри (H. Oliveira) та співавторів показано, що опромінення людських кератиноцитів світлодіодними сушарками призводить до зниження їхньої життєздатності, підвищення рівня ROS та індукції апоптозу [4]. Подібні результати наведено А. Слабіцькою-Якубчик (А. Słabicka-Jakubczyk), М. Левандовські (M. Lewandowski), П. Пастужаком (P. Pastuszek) та колегами, які встановили залежність зниження метаболічної активності кератиноцитів від інтенсивності та тривалості дії UV-випромінювання [5]. Е. Фінн (E. Finn), Л. Дусан (L. Dussan), С. Розентал (S. Rosenthal) та співавтори підкреслили, що ключовим модифікуючим чинником фототоксичності є температура під час опромінення, яка істотно впливає на ступінь клітинного пошкодження [6]. Дослідження К. А. Арділи Падільї (C. A. Ardila Padilla), М. Вінйоні (M. Vignoni), М. П. Серрано (M. P. Serrano) та колег підтвердили руйнування білкових структур унаслідок побутового опромінення, що демонструє ознаки фототоксичності навіть за короткочасного впливу [7]. Сукупність цих даних обґрунтовує необхідність у встановленні нормативних меж безпечного LED-опромінення та розроблення біосумісних параметрів використання побутових світлотерапевтичних пристроїв.

Третій напрям присвячено вивченню спектрозалежних ефектів випромінювання на клітини шкіри. А. Цюш (A. Cios), М. Цепеляк (M. Cierielak), Л. Шиманський (Ł. Szymański) та співавтори довели, що синє світло пригнічує проліферацію клітин, тоді як червоне – стимулює мітохондріальну активність і метаболізм [8]. Л. А. Перес Гонсалес (L. A. Pérez González), М. А. Мартінес-Паскуаль (M. A. Martínez-Pascual), Е. Толедано-Масіас (E. Toledano-Macías) та колеги показали, що комбінація червоного та синього спектра у поєднанні з тербінафіном знижує оксидативний стрес у кератиноцитах без втрати життєздатності [9]. Дослідження Л. Гадсон (L. Hudson), Е. Рашдан (E. Rashdan), К. А. Бонна (C. A. Bonn) та співавторів демонструє, що сукупний вплив UV-, видимого й інфрачервоного випромінювання спричиняє зростання маркерів клітинного ушкодження, зокрема білкового окислення та ДНК-пошкоджень [10]. Отримані результати підкреслюють важливість подальшого визначення оптимальних комбінацій довжин хвиль, здатних забезпечити терапевтичний ефект за мінімізації ризиків фотостресу.

Четвертий напрям пов'язаний з аналізом молекулярних механізмів фотобіомодуляції та світлоіндукованих пошкоджень. М. Жівагуї (M. Zhivagui), А. Хода (A. Hoda), Н. Валенсуела (N. Valenzuela) та співавтори довели, що навіть нетривалий вплив LED-випромінювання від побутових сушарок може спричинити ДНК-пошкодження і соматичні мутації в клітинах шкіри [11]. Дж. Й. Фурукава (J. Y. Furukawa), Р. М. Мартінес (R. M. Martinez), А. Л. Морочо-Хакме (A. L. Morochó-Jácome) та колеги у своєму огляді систематизували дані щодо механізмів впливу UV-, видимого й інфрачервоного спектрів на клітинні структури епідермісу [12]. М. Л. Ернандес-Буле (M. L. Hernández-Bule), Х. Нахарро-Родрігес (J. Naharro-Rodríguez), С. Баччі (S. Bacci) та співавтори показали, що LED-випромінювання при дотриманні оптимальних параметрів здатне стимулювати проліферацію, мітотичну активність і

зменшувати запальну відповідь [13]. Й. Рок (J. Rok), З. Жепка (Z. Rzerka), Й. Ковальська (J. Kowalska) та колеги продемонстрували, що медикаментозно індукована фоточутливість у меланоцитах суттєво підвищується при опроміненні UVA/UVB, що вказує на необхідність врахування фармакологічного контексту під час світлотерапевтичних процедур [14]. А. Рубіо (A. Rubio), А. Г. Ісмер (A. H. Issmer), А. Барбаро (A. Barbaro) та співавтори запропонували використовувати інтенсивність ультраслабкого фотонного випромінювання як потенційний індикатор клітинного стресу після LED-експозиції [15]. Сукупність цих даних свідчить про глибокі молекулярні ефекти спектрального світла та підкреслює необхідність комплексного підходу до оцінки його безпеки, що поєднує фотобіофізичні, генетичні та метаболічні маркери. Проліферативна активність клітин шкіри та нігтів виявляє високу чутливість до спектрального складу LED-випромінювання, а наукові дані вказують на можливість як стимулюючих, так і цитотоксичних ефектів залежно від довжини хвилі, інтенсивності, тривалості дії та супутніх фізіологічних і фармакологічних чинників.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний прогрес у вивченні впливу LED-випромінювання на біологічні тканини, залишаються невирішеними низка важливих аспектів. Недостатньо систематизовано спектральні характеристики LED-джерел, що застосовуються у дерматології та косметології, та їх зв'язок із конкретними біологічними ефектами. Обмежено досліджено внутрішньоклітинні механізми регуляції проліферації під дією світла, зокрема роль мітохондріальних процесів, окисно-відновної рівноваги та сигнальних каскадів. Відсутні узагальнені дані щодо залежності клітинної відповіді від інтенсивності, тривалості та частоти опромінення, а також чіткі протоколи безпечного використання LED у процедурах для шкіри та нігтів з урахуванням

біологічних ризиків.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом комплексного аналізу спектральних властивостей LED-випромінювання, вивчення його впливу на внутрішньоклітинні процеси та визначення оптимальних параметрів опромінення для досягнення терапевтичного ефекту без шкоди для тканин. Розробка науково обґрунтованих рекомендацій дозволить створити стандартизовані та персоналізовані протоколи LED-терапії, що підвищить її безпеку й ефективність у медико-косметологічній практиці.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Мета статті — аналіз впливу спектрального складу LED-випромінювання на проліферативну активність клітин шкіри та нігтів.

Завдання статті:

1. Дослідити внутрішньоклітинні механізми регуляції проліферації під впливом LED-випромінювання, зокрема роль мітохондріальних процесів, окисно-відновного балансу та сигнальних шляхів.
2. Охарактеризувати потенційні біологічні ефекти залежно від параметрів опромінення та обґрунтувати практичні підходи до його безпечного застосування у медико-косметологічній сфері.
3. Визначити залежність клітинної відповіді від параметрів опромінення (інтенсивності, тривалості, частоти експозиції).
4. Виявити ключові проблеми та біологічні ризики, пов'язані з використанням LED-випромінювання у практиці догляду за шкірою та нігтями.
5. Сформулювати рекомендації щодо раціонального застосування LED-технологій з урахуванням спектральної чутливості клітинних структур.

Виклад основного матеріалу. Спектральні характеристики LED-

випромінювання відіграють ключову роль у визначенні його біологічної активності під час впливу на тканини шкіри та нігтів. У дерматології та косметології переважно застосовуються вузькосмугові джерела світла, які випромінюють у межах видимого та ближнього інфрачервоного спектрів. Довжина хвилі зумовлює глибину проникнення у тканини, а також тип клітинної відповіді – від стимуляції проліферації до запуску апоптозу або протизапальних ефектів. Для досягнення терапевтичного або косметичного ефекту важливими є не лише спектральні параметри, а й щільність потоку енергії, режим подачі світла (імпульсний чи безперервний) та тривалість експозиції (табл. 1).

Таблиця 1

Спектральні діапазони LED-випромінювання, що застосовуються у шкірно-косметологічній практиці, та їх біологічні ефекти

Діапазон хвиль, нм	Колір випромінювання	Глибина проникнення	Основні біологічні ефекти	Типові клінічні застосування
405–450	Фіолетовий / синій	0,5–1 мм	Антибактеріальна дія, зменшення продукції себуму, пригнічення <i>Propionibacterium acnes</i>	Лікування акне, фотодезінфекція
520–550	Зелений	≈1 мм	Зменшення пігментації, заспокійливий ефект	Корекція гіперпігментації, вирівнювання тону шкіри
580–600	Жовтий / бурштиновий	1–2 мм	Поліпшення мікроциркуляції, стимуляція лімфодренажу	Усунення набряків, розгладження шкіри
620–660	Червоний	2–4 мм	Стимуляція проліферації фібробластів, активація синтезу колагену, протизапальна дія	Омолодження, загоєння тканин, стимуляція росту нігтів

800–850	Інфрачервоний	>5 мм	Стимуляція глибокої мікроциркуляції, знеболювальна дія	Регенерація тканин, зменшення м'язової напруги
---------	---------------	-------	--	--

Джерело: сформовано автором на підставі [3, с. 1268–1270; 4; 5; 8; 9, с. 4–6; 10, с. 3875–3876; 12, с. 2–5]

У дерматологічній і косметологічній практиці вибір спектрального діапазону LED-випромінювання здійснюється з урахуванням специфіки цільових тканин, бажаного клінічного ефекту та індивідуальних особливостей пацієнта. Наприклад, фіолетово-синє світло, яке переважно діє у поверхневих шарах епідермісу, забезпечує виражений антимікробний ефект завдяки здатності індукувати фотодинамічне утворення активних форм кисню, що ушкоджують бактеріальні клітини [4]. Це дозволяє зменшувати запалення без застосування антибіотиків, що особливо важливо у резистентних формах акне [8]. Світло середнього діапазону (зелене та жовте) має обмежену глибину проникнення, проте позитивно впливає на тонус капілярів, знижує вираженість судинної сітки та пігментних плям. Його ефекти пов'язують із модуляцією вивільнення гістаміну та посиленням локального лімфовідтоку, що сприяє зменшенню набрякості та поліпшенню загального кольору шкіри [3, с. 1269–1270; 10, с. 3875–3876]. Найбільшу увагу в клінічній фототерапії приділяють червоному та інфрачервоному спектрам, які мають найвищу проникаючу здатність і взаємодіють із мітохондріальними хромофорами – насамперед цитохромом С-оксидазою. Це запускає каскад біостимуляційних процесів: підвищення рівня АТФ, активацію проліферації фібробластів, стимуляцію ангиогенезу. Такі ефекти лежать в основі терапії хронічних ран, корекції фотостаріння, а також використовуютьс для відновлення нігтьової пластини після травм чи агресивних косметичних процедур. У клінічній практиці червоний спектр часто комбінується з мезотерапією, мікронідлінгом

або хімічними пілінгами для підвищення регенераційних процесів.

LED-випромінювання, залежно від довжини хвилі, здатне впливати на клітинну проліферацію через активацію мітохондріальних хромофорів, передусім цитохрому с-оксидази. Поглинання фотонів ініціює каскад реакцій: підвищення продукції АТФ, модуляцію окисно-відновного балансу та залучення сигнальних шляхів, зокрема PI3K/Akt, MAPK або NF-κB. Унаслідок цього змінюється динаміка клітинного циклу, інтенсивність поділу та швидкість регенерації. Біологічний ефект визначається не лише спектром, а й інтенсивністю та тривалістю впливу, що зумовлює різноспрямовану клітинну відповідь – від біостимуляції до апоптозу (табл. 2).

Таблиця 2

Внутрішньоклітинні механізми проліферативної відповіді на LED-випромінювання різного спектра

Спектр (нм)	Ключові клітинні мішені	Мітохондріальна відповідь	Сигнальні шляхи	Біологічний ефект
405–450 (синє)	NADPH-оксидаза, клітинні мембрани	Генерація ROS, помірний оксидативний стрес	MAPK/JNK, p53	Антимікробна дія, можливий апоптоз
520–550 (зелене)	Флавопротеїни, антиоксидантні ферменти	Стабілізація редокс-стану	ERK1/2	Легка стимуляція проліферації
620–660 (червоне)	Цитохром с-оксидаза, SOD2	Підвищення АТФ, зниження оксидативного стресу	PI3K/Akt, NF-κB	Активация проліферації, репарація
800–850 (ІЧ)	Цитохроми, кальцієві канали	Глибока стимуляція енергетичного обміну	Ca ²⁺ -залежні каскади, TGF-β	Прискорення регенерації, стимуляція ангіогенезу

Джерело: сформовано автором на підставі [6, с. 551–556; 8; 9, с. 5–6; 10, с. 3876; 11; 12, с. 2–6; 13]

У практичному контексті червоне (630–660 нм) та ближнє інфрачервоне (800–850 нм) LED-випромінювання широко застосовується у процедурах

біостимуляції шкіри, стимулюючи синтез колагену, прискорюючи загоєння та зменшення запалення. Такий ефект зумовлений активацією мітохондріальної енергопродукції та сигнальних каскадів, які регулюють проліферацію та відновлення клітин. Зокрема, у дерматокосметології червоне світло застосовують після лазерних шліфуваль, пілінгів або мезотерапії для зменшення періоду реабілітації та запобігання формуванню фіброзу. У сфері догляду за нігтями LED-випромінювання використовують для прискорення росту нігтьової пластини після мікротравм або зняття штучних покриттів – завдяки активізації трофіки та проліферативної здатності матриксу. Синій спектр зберігає ефективність у контролі мікробної флори та пригніченні запальних процесів, однак потребує обережного застосування через здатність індукувати окисний стрес у разі надмірного опроміненн. Зелене світло демонструє помірну біологічну активність, стабілізуючи редокс-гомеостаз і потенційно знижуючи реактивність гіперчутливої шкіри. Таким чином, LED-випромінювання розглядають як перспективний інструмент безмедикаментозної модуляції клітинної активності за умови ретельного контролю параметрів експозиції.

Параметри LED-опромінення, такі як інтенсивність, тривалість та частота, суттєво впливають на характер клітинної відповіді. Надмірна доза може викликати фотострес або апоптоз, тоді як оптимальні значення стимулюють проліферацію та регенерацію. Біологічна дія світла має дозозалежний характер, що підкреслює необхідність точного налаштування режиму опромінення у терапевтичній та косметологічній практиці (табл. 3).

Таблиця 3

**Вплив параметрів LED-опромінення на біологічну відповідь клітин
епідермісу та нігтьової пластини**

Параметр опромінення	Низьке значення	Оптимальне значення	Високе значення	Біологічна відповідь клітин
Інтенсивність (мВт/см ²)	<5	10–50	>100	Стимуляція ↔ гальмування
Тривалість експозиції	<1 хв	5–20 хв	>30 хв	Недостатній ефект ↔ фотострес
Частота процедур	<1 раз/тиждень	2–3 рази/тиждень	Щодня або кілька разів на день	Накопичення ефекту ↔ десенситизація
Режим опромінення	Імпульсний низької частоти	Безперервний або модульований	Імпульсний високої частоти	М'яке стимулювання ↔ нестабільна реакція

Джерело: сформовано автором на підставі [1, с. 28–31; 2, с. 288–289; 4; 5; 6, с. 553–558; 7, с. 183–190; 13]

Клінічний ефект LED-випромінювання визначається не лише спектром, а насамперед параметрами його подачі – інтенсивністю, тривалістю експозиції та частотою процедур. Поєднання цих чинників формує дозу світлової енергії, яку поглинає клітина, й, відповідно, формує її біологічну відповідь [13]. Наприклад, за недостатньої інтенсивності (<5 мВт/см²) клітини не досягають порогу фотостимуляції, і проліферація залишається на базовому рівні. Навпаки, надмірне опромінення (>100 мВт/см² або >30 хв/сеанс) спричиняє гіперактивацію сигнальних каскадів, що може призвести до оксидативного стресу та апоптозу. У побутових LED-масках типова помилка – опромінення понад 20 хвилин щодня без урахування фототипу шкіри, товщини епідермісу чи індивідуальної чутливості [4]. Такий режим здатний викликати фоточутливість, мікрозапалення або ефект «звикання» – зниження клітинної реакції на стимул [7, с. 185–189]. У клінічній практиці цю проблему вирішують

через попередній фототипувальний аналіз та застосування пристроїв із регульованими параметрами (інтенсивність, імпульсний режим, час дії). Для догляд за нігтьовою пластиною, зокрема після зняття гелевих покриттів або при мікропошкодженнях матриксу, оптимальним є опромінення тривалістю 8–12 хвилин із частотою 2–3 рази на тиждень. Перевищення рекомендованого режиму не прискорює регенерацію, а порушує внутрішньоклітинний гомеостаз [9, с. 6], що проявляється зниженням метаболічної активності клітин і сповільненням утворення нової нігтьової пластини [7, с. 188–190; 14]. Використання модульованих або імпульсних режимів дозволяє зменшити теплове навантаження на тканини, одночасно підтримуючи ефективну активацію клітинних рецепторів [13], що особливо важливо у пацієнтів із підвищеною чутливістю шкіри чи порушенням мікроциркуляції.

Попри широке впровадження LED-випромінювання у дерматології та косметології, існує проблеми, що обмежують їх безпечно та ефективно використання. Однією з ключових є відсутність стандартизації параметрів опромінення: у більшості процедур не регламентовано оптимальні дози, тривалість, частоту та режим впливу, що призводить до нерівномірної клінічної ефективності та підвищує ризик небажаних реакцій [13]. Особливо це стосується побутових LED-пристроїв, які часто зостосовують без урахування фототипу шкіри чи стану нігтьової пластини [4]. Перевищення допустимої дози спричиняє оксидативний стрес і порушення редокс-гомеостазу, що може пошкоджувати клітинні структури, знижувати життєздатність клітин та запускати апоптоз [6, с. 551–556; 9, с. 5–6]. Для клітин нігтьового матриксу це особливо небезпечно, оскільки надлишкове опромінення може уповільнити ріст нігтя або викликати його деформації [2, с. 288–289; 7, с. 183–190]. Ще однією проблемою є неселективність впливу: LED-опромінення не розрізняє здорові та потенційно змінені клітини, що створює

теоретичний ризик активації пренеопластичних елементів [11]. Поширеним ускладненням є фотосенсибілізуючі реакції при поєднанні LED-процедур з медикаментами або косметичними засобами, які підвищують чутливість до світла [14], що може спричинити локальні запалення, пігментацію або підвищення чутливості тканин [7, с. 186–189]. Окрім цього, відсутність довготривалих досліджень щодо впливу світлової стимуляції на генетичну стабільність і клітинний цикл не дозволяє повністю оцінити віддалені ризики при регулярному застосуванні LED у зонах з високою проліферативною активністю.

Раціональне застосування LED-технологій у дерматологічних та нігтьових процедурах потребує врахування спектральної чутливості клітинних структур, що визначає глибину проникнення світла, інтенсивність біологічної відповіді та профіль ефекту. Червоне (620–660 нм) та ближнє інфрачервоне (800–850 нм) випромінювання є найбільш ефективними для стимуляції проліферації, посилення мікроциркуляції та активації мітохондріального обміну. Ці діапазони доцільно застосовувати у процедурах загоєння, відновлення шкіри після агресивних втручань і стимуляції росту нігтьової пластини. Синє світло (405–450 нм), зважаючи на його обмежену глибину проникнення та виражену антимікробну дію, рекомендовано використовувати при лікуванні поверхневих запальних станів, наприклад акне, але з обмеженою тривалістю та інтенсивністю через ризик фотостресу. Застосування універсальних протоколів є недоцільним: параметри опромінення слід адаптовувати до конкретної біологічної задачі, стану тканини, фототипу шкіри та чутливості до фотонної енергії. Оптимальні параметри для стимулюючих ефектів у межах 10–50 мВт/см², експозиція 5–15 хвилин, частота не більше 3 процедур на тиждень. Імпульсний режим переважно рекомендований для пацієнтів з підвищеною чутливістю або на

етапі відновлення після шкірних пошкоджень. У догляді за нігтями доцільно обмежити вплив короткими курсами (7–10 сеансів), поєднуючи опромінення з живильними процедурами для матриксу. Систематичне перевищення дозування чи спроби «прискорити ефект» можуть спричинити зворотний результат через десенситизацію рецепторів. Для домашнього використання LED-пристроїв рекомендується суворо дотримуватись інструкцій виробника, надаючи перевагу моделям із вбудованим регулятором інтенсивності та таймером. Запровадження персоналізованих схем LED-терапії з урахуванням спектральної дії, типу тканини та мети втручання дозволить підвищити ефективність процедур, зменшити ризик побічних ефектів і забезпечити стабільний, довготривалий результат без порушення клітинного гомеостазу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У ході дослідження встановлено, що проліферативна активність клітин шкіри та нігтів залежить від спектрального складу LED-випромінювання. Червоне (620–660 нм) та інфрачервоне (800–850 нм) світло сприяють активації мітохондріальних процесів, синтезу АТФ та стимуляції регенерації, тоді як синє (405–450 нм) зумовлює генерацію ROS та пригнічує проліферацію через активацію проапоптичних сигнальних каскадів. Ефекти опромінення виявилися дозозалежними: оптимальні параметри (інтенсивність, тривалість, частота експозиції) активують клітинну відповідь, тоді як перевищення порогових значень спричиняє фотострес і гальмує процеси регенерації. Серед ключових проблем виокремлено відсутність стандартизованих протоколів, ризики неконтрольованого впливу у побутових умовах, фотосенсибілізуючі реакції при поєднанні з певними фармакологічними засобами, а також недостатність довготривалих досліджень щодо безпеки повторного опромінення. Встановлено, що LED-випромінювання діє неселективно, що створює потенційні ризики активації патологічно змінених клітин. У зв’язку з цим

рекомендовано індивідуалізувати параметри LED-опромінення з урахуванням спектральної чутливості тканин, фототипу шкіри, клінічної мети та типу процедури. Червоне та ІЧ-випромінювання доцільно застосовувати для стимуляції росту й загоєння, синє – для антимікробного впливу з обов'язковим контролем дози. Перспективи подальших досліджень охоплюють:

- уточнення молекулярних маркерів фоточутливості клітин;
- розробку персоналізованих схем світлотерапії;
- оцінку довгострокових ефектів LED-опромінення в умовах клінічного і домашнього використання.

Література

1. Готра З. Ю., Павлов С. В., Злепко С. М., Клапоушак А. Ю., Коробов А. М., Козловська Т. І. Математична модель для аналізу нагрівання шкіри людини і сусідніх внутрішніх шарів за допомогою LED-випромінювання. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2019. № 1–2. С. 27–32. URL: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2019-1-28-27-32> (дата звернення: 08.08.2025).
2. Marciniak A., Ciesielski B., Juniewicz M., Prawdzik-Dampc A., Sawczak M. The effect of sunlight and UV lamps on EPR signal in nails. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2019. Vol. 58, № 3. P. 287–293. URL: <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00777-2> (date of access: 08.08.2025).
3. de Gálvez E. N., Aguilera J., de Gálvez M. V., Fonda-Pascual P., Herrera-Ceballos E., Gago-Calderón A. Effect of nail thickness on visible radiation transmittance: implications for new photodynamic therapy technologies in onychomycosis. *Photochemistry and Photobiology*. 2020. Vol. 96, № 6. P. 1267–1272. URL: <https://doi.org/10.1111/php.13296> (date of access: 08.08.2025).

4. Lopes A., Pereira P., Oliveira H. Cytotoxic effects of a LED/UV nail polish dryer in human keratinocytes. *Toxicology in Vitro*. 2025. Vol. 109. Article 106124. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2025.106124> (date of access: 08.08.2025).

5. Słabicka-Jakubczyk A., Lewandowski M., Pastuszak P., Barańska-Rybak W., Górska-Ponikowska M. Influence of UV nail lamps radiation on human keratinocytes viability. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, № 1. Article 22530. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49814-7> (date of access: 08.08.2025).

6. Finn E., Dussan L., Rosenthal S., Simbulan-Rosenthal C., Rosenthal D., Sykora P. Temperature is a key factor governing the toxic impact of Ultra-Violet Radiation-Emitting nail dryers when used on human skin cells. *International Journal of Toxicology*. 2024. Vol. 43, № 6. P. 549–560. URL: <https://doi.org/10.1177/10915818241268617> (date of access: 08.08.2025).

7. Ardila Padilla C. A., Vignoni M., Serrano M. P., Dántola M. L. Phototoxic Effects on Skin Biomolecules Induced by a Domestic Nail Polish Dryer Device. *Chemical Research in Toxicology*. 2025. Vol. 38, № 1. P. 182–192. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.4c00401> (date of access: 08.08.2025).

8. Cios A., Ciepielak M., Szymański Ł., Lewicka A., Cierniak S., Stankiewicz W., Lewicki S. Effect of different wavelengths of laser irradiation on the skin cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22, № 5. Article 2437. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms22052437> (date of access: 08.08.2025).

9. Pérez González L. A., Martínez-Pascual M. A., Toledano-Macías E., Jara-Laguna R. C., Fernández-Guarino M., Hernández-Bule M. L. Effect of Combination of Blue and Red Light with Terbinafine on Cell Viability and Reactive Oxygen Species in Human Keratinocytes: Potential Implications for Cutaneous Mycosis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25, № 22. Article 12145.

URL: <https://doi.org/10.3390/ijms252212145> (date of access: 08.08.2025).

10. Hudson L., Rashdan E., Bonn C. A., Chavan B., Rawlings D., Birch-Machin M. A. Individual and combined effects of the infrared, visible, and ultraviolet light components of solar radiation on damage biomarkers in human skin cells. *The FASEB Journal*. 2020. Vol. 34, № 3. P. 3874–3883. URL: <https://doi.org/10.1096/fj.201902351RR> (date of access: 08.08.2025).

11. Zhivagui M., Hoda A., Valenzuela N., Yeh Y. Y., Dai J., He Y., Alexandrov L. B. DNA damage and somatic mutations in mammalian cells after irradiation with a nail polish dryer. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14, № 1. Article 276. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35876-8> (date of access: 08.08.2025).

12. Furukawa J. Y., Martinez R. M., Morocho-Jácome A. L., Castillo-Gómez T. S., Pereda-Contreras V. J., Rosado C., Baby A. R. Skin impacts from exposure to ultraviolet, visible, infrared, and artificial lights—a review. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy*. 2021. Vol. 23, № 1–2. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1080/14764172.2021.1950767> (date of access: 08.08.2025).

13. Hernández-Bule M. L., Naharro-Rodríguez J., Bacci S., Fernández-Guarino M. Unlocking the power of light on the skin: a comprehensive review on photobiomodulation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25, № 8. Article 4483. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms25084483> (date of access: 08.08.2025).

14. Rok J., Rzepka Z., Kowalska J., Banach K., Beberok A., Wrześniok D. Molecular and biochemical basis of minocycline-induced hyperpigmentation—the study on normal human melanocytes exposed to UVA and UVB radiation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22, № 7. Article 3755. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms22073755> (date of access: 08.08.2025).

15. Rubio A., Issmer A. H., Barbaro A., Montalvo G., Ortega-Ojeda F. E.,

Garcia-Ruiz C. Effects of light exposure on human ultra-weak photon emission: Preliminary findings for a pioneering control tool in cosmetics. *Microchemical Journal*. 2024. Vol. 205. Article 111351. URL: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111351> (date of access: 08.08.2025).