

УДК 615.849.19:[57.08+53.047]

ВПЛИВ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

В.В. Пантьо, В.І. Ніколайчук, В.І. Пантьо

Вплив низькоінтенсивного лазерного випромінювання на біологічні об'єкти (огляд літератури). - В.В. Пантьо, В.І. Ніколайчук, В.І. Пантьо - У статті розглядаються деякі аспекти впливу низькоінтенсивного лазерного випромінювання різних довжин хвиль на біологічні об'єкти різних рівнів організації – клітину, тканину, організм у цілому; оцінюється механізм відповіді біооб'єктів на цей вплив; звертається увага на залежність біологічного ефекту від специфіки випромінювання, передусім довжини хвилі, та специфіки об'єкту.

Ключові слова: лазерне випромінювання, біологічний об'єкт, біологічний ефект.

Адреса: Ужгородський національний університет, Кафедра генетики, фізіології рослин та мікробіології; 88000, м. Ужгород, вул. Щедрина 50; тел./факс: (8032)644615

E-mail: pantyo@mail.uzhgorod.ua

Influence of low-intensive laser radiation on biological objects (examination of literature). - V.V. Pantyo, V.I. Nikolaychuk, V.I. Pantyo - In issue are examined some aspects of influence of low-intensive laser radiation of different wavelength on biological objects of different levels of organization – cell, tissue, organism on the whole; the mechanism of response of bioobjects on this influence is estimated; attention applies on dependence of biological objects on the specific of radiation, foremost wavelength, and on specifics of object.

Keywords: laserradiation, biologicalobject, biological effect

Address: Uzhgorod National University; Department of genetics, phytophysiology and microbiology; 88000, Uzhgorod, str. Schedrina 50; tel./fax: (8032)644615

E-mail: pantyo@mail.uzhgorod.ua

Вступ

Клініко-експериментальні дані, отримані в ході розвитку лазерної медицини, свідчать про необхідність дослідження її біологічних ефектів з позиції взаємодії низькоінтенсивного лазерного випромінювання (НІЛВ) з біологічними об'єктами.

Фізичні основи взаємодії низькоінтенсивного лазерного випромінювання з біологічною тканиною дуже багатогранні в деталях, багато з яких залишають питання для подальшого активного їх вивчення.

Різноманітність структур біотканин визначає різний характер проходження лазерного випромінювання через них. Характер взаємодії світла з біотканнюю залежить як від параметрів джерела випромінювання (довжина хвилі, інтенсивність, довжина та частота повторення імпульсів тощо), так і від параметрів біотканин (ступінь однорідності та пігментації тканини, її теплові та пружні властивості тощо).

Існує чотири типи взаємодії лазерного випромінювання з біологічною тканиною: поглинання, розсіювання, відбивання та передача (рис.1.) [6, 7, 21].

Поглинання (Φ погл) – домінуючий ефект взаємодії лазерного випромінювання з тканинами, оскільки лише поглинена частина лазерного випромінювання виявляє біологічну дію на організм (рис 1).

Ступінь поглинання світла тією чи іншою біологічною тканиною визначається коефіцієнтом поглинання цієї тканини. Останній корелює з глибиною проникнення лазерного випромінювання у тканини. Чим більше поглинання світла у певному хромофорі (пігмент, вода), тим менша глибина його проникнення у біотканню.

За даними ряду вітчизняних та зарубіжних авторів: А. В. Черкасов (1986 р.), В. І. Матвеев (1988 р.), А. Р. Євстигнєєв (1987 р.), В. С. Синяков (1983 р.), Јооп зі співавт. (1987 р.), Muller (1990 р.), Oshiro (1988 р.) та інших глибина проникнення низькоінтенсивного лазерного випромінювання у біооб'єкт залежить від довжини хвилі випромінювання. Проникна здатність випромінювання від ультрафіолетового до помаранчевого діапазону поступово збільшується від 1-20 мкм до 2,5 мм, з різким збільшенням глибини проникнення у червоному діапазоні до 20-30 мм. Найбільша проникна

здатність відповідає ближньому інфрачервоному діапазону. У дальній інфрачервоній області спектра відбувається різке зниження проникності.

Глибина проникнення лазерного випромінювання певної довжини хвилі визначається в основному ступінню поглинання даної довжини хвилі молекулами води, які містяться у поверхневих шарах шкіри. Так, молекулами води найбільш ефективно адсорбується випромінювання ультрафіолетового та інфрачервоного діапазонів спектру, саме тому випромінювання з такими довжинами хвиль

проникає через шкіру на найменшу глибину. Випромінювання з довжинами хвиль 0,6-1,5 мкм відносно слабо поглинається молекулами води і тому досить глибоко проникає у біотканини. Таким чином, максимуми пропускання шкірою електромагнітного випромінювання знаходяться у червоній та ближній інфрачервоній областях спектру (так звана прозорість біологічних тканин) (Рис. 2.) [21, 30].

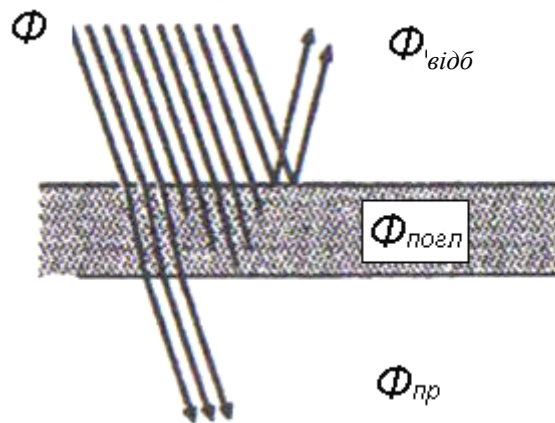


Рис. 1. Оптичні властивості біотканини,

де Φ - падаючий потік променів, $\Phi' \text{ відб}$ - потік променів, який відбивається, $\Phi \text{ погл}$ - потік променів, який поглинається, $\Phi \text{ пр}$ - потік променів, який пропускається.

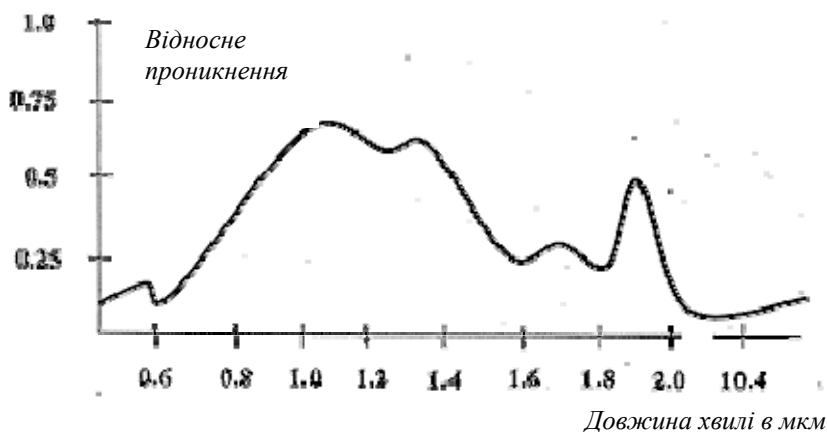


Рис. 2. Глибина відносного проникнення лазерного випромінювання у біологічні тканини в залежності від довжини хвилі світла

Ступінь поглинання лазерного випромінювання у значній мірі залежить від виду біологічної

тканини. Різні тканини мають різні коефіцієнти поглинання лазерного випромінювання тієї самої

довжини хвилі. Так, у червоній та ближній інфрачервоній областях спектру ($\lambda = 620-1300$ нм) шкіра поглинає 25-40 % лазерного випромінювання, м'язи та кісткова тканина – 30-80 %, паренхімні органи (серце, печінка, нирки, підшлункова залоза, селезінка) – до 100 %.

Розробці методу визначення коефіцієнтів пропускання та відбивання були посвячені досліді Г. Г. Шамаєвої та ін. (1969). Дані, отримані цим методом при опроміненні шурів неодимовим лазером, були використані для розрахунку коефіцієнта поглинання тканини шкіри, який склав $9,9 \text{ см}^{-1}$.

Л. І. Дерлеменко (1969), М. І. Данко та ін. (1972) з допомогою інтегрального фотометра виявляли поглинання випромінювання неодимового лазера тканинами м'язів та печінки шурів. Через шар тканини товщиною 1 мм при опроміненні м'язів проходило 27-32 % випромінювання, печінки – 20-23 %. Для шарів тканини товщиною 6 мм цей показник склав відповідно 3 та 1,5 %.

Ці експериментальні дані демонструють залежність поглинання лазерного випромінювання від ступеню забарвлення тканини: сильно пігментована тканина печінки поглинає випромінювання інтенсивніше за тканину м'язів. Така ж закономірність спостерігалась і у досліді по опроміненню рубіновим та неодимовим лазерами різних пухлин у тварин. Завдяки наявності меланіну, найбільше поглинання властиве меланомам.

Таким чином, спектр поглинання лазерного випромінювання визначається типом домінуючих поглинальних центрів із вмістом води у клітині та тканині. Характер дії лазерного випромінювання на клітину визначається її складом та коефіцієнтом поглинання різних довжин хвиль випромінювання [1, 7, 23, 29, 31].

Оскільки біологічні тканини є оптично неоднорідним середовищем поглинання із середнім показником заломлення більшим, ніж у повітря, на межі розділу „біооб'єкт-повітря” частина випромінювання відбивається.

Відбивання (Φ відб) – основна причина втрати енергії лазерного випромінювання при дії на біологічний об'єкт (рис. 1). Для більшості внутрішніх органів коефіцієнт відбивання у видимій та ближній інфрачервоній областях спектру складає 10-30 %, а відбивання очного дна змінюється від 2 до 20 % для довжин хвиль 0,4-1,0 мкм. Коефіцієнт відбивання лазерного випромінювання шкірою знаходиться у межах 10-55 % та залежить від спектру випромінювання, а також від ступені пігментації та зморшкватості шкіри, наявності у ній жиру та вологи, які у свою чергу, залежать від статі, віку та кольору шкіри.

Збільшення кута падіння променя на тканину призводить до різкого зростання коефіцієнта відбивання. Останній знижується в середньому на

15 % при охолодженні ділянки дії. У жінок коефіцієнт відбивання на 5-7 % вищий, ніж у чоловіків. У осіб похилого віку (60 років і старше) він нижчий у порівнянні з молодими. Колір шкіри також суттєво впливає на коефіцієнт відбивання: чим темніша шкіра, тим нижчий коефіцієнт відбивання. На ділянках пігментації коефіцієнт відбивання знижується на 6-8 %. Жирна шкіра, особливо після масажу або косметики, відбиває набагато більше променів, ніж суха. Тому, щоб зменшити відбивання та підвищити ефективність дії лазера, рекомендується перед процедурою очищувати зону дії від жиру та поту шляхом протирання її спиртом чи ефіром [13, 21].

У зв'язку з тим, що біосистеми, як правило, складаються із великого числа випадково розділених у об'ємі розсіювальних центрів, промені, які проникають до тканини частково розсіюються. Основними розсіювачами для більшості біотканин є клітинні мембрани, ядра та органели клітини. *Розсіювання* (рис. 1) випромінювання всередині біотканини залежить від негомогенних структур тканини та визначається показниками заломлення різних частинок та різницею показників заломлення між частинками та оточуючим їх середовищем. Хвилі, які мають довжину більшу за діаметр частинки (більше 10 мкм), розсіюються ними у незначній мірі.

Для більшості біотканин розсіювання – вагома складова у видимій та ближній інфрачервоній областях спектру. Для довжин хвиль 0,45-0,59 мкм розсіювання та поглинання відіграють приблизно рівнозначну роль у проникненні лазерного випромінювання крізь тканину, а для довжин хвиль 0,6-1,5 мкм розсіювання переважає над поглинанням.

Таким чином, головний ефект взаємодії лазерного випромінювання з біологічною тканиною – результат його поглинання останньою [3, 9, 12, 27].

Останнім часом інтенсивно розробляється концепція прямої дії НІЛВ на біооб'єкт внаслідок резонансного поглинання лазерного випромінювання на молекулярному рівні (Т. Кагу, 1989). На користь цієї концепції свідчить ряд обставин.

По-перше, у досліді *in vitro* кількісні спектроскопічні дослідження показали резонансний характер впливу НІЛВ на різні клітини у залежності від довжини хвилі випромінювання, а також дози та потужності.

По-друге, більшість ефектів низькоінтенсивної лазерної стимуляції є вторинними. Дані сучасної фізіології заперечують наявність у шкірі тварин та людини специфічних фоторецепторів. Внаслідок цього зміни психофізіологічного стану людини, які спостерігаються при дії НІЛВ пов'язані із змінами внутрішньоклітинного метаболізму, тобто є наслідками вторинних ефектів.

Узагальнюючи літературні дані щодо впливу лазерного випромінювання низької інтенсивності на біологічні об'єкти, можна виділити наступні рівні реалізації реакції організму на цей вплив:

Субклітинний (молекулярний) – виникнення збуджених станів молекул, утворення вільних радикалів, стереохімічна перебудова молекул, збільшення швидкості синтезу білків, РНК, ДНК, зміна активності окисно-відновних процесів;

Клітинний – зміна заряду електричного поля клітини, її мембранного потенціала, збільшення проліферативної активності тощо;

Тканинний – зміна рН міжклітинної рідини, морфо-функціональної активності та мікроциркуляції;

Органний – нормалізація функції певного органа;

Системний та організменний – виникнення комплексних адаптаційних нейро-рефлекторних та нейро-гуморальних реакцій з подальшою активацією симпатоадреналової та імунної систем [5, 20, 27].

Вплив НЛВ на молекулярному рівні. Реалізація біологічного ефекта НЛВ починається з моменту поглинання енергетичного кванта фоточутливою біомолекулою. У біооб'єктах наявні фоточутливі акцептори, які поглинають випромінювання різних довжин хвиль. Фотобіологічною активністю володіє світло в ультрафіолетовій, видимій та ближній інфрачервоній областях спектру. Для кожного спектру НЛВ існують відповідні молекули, які його найбільш інтенсивно поглинають.

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання поглинається переважно молекулами нуклеїнових кислот, білків та ліпідів. Встановлено, що найбільшу дію УФ промені проявляють на азотисті основи нуклеїнових кислот, що призводить до мутацій та загибелі клітин. Подібні фотохімічні реакції спостерігаються також у молекулах білків та ліпідів. У залежності від потужності УФ випромінювання такі реакції можуть проявлятися у зниженні ферментативної активності білків та функціональних властивостей клітинних мембран. Фотодеструкцію білків викликає УФ випромінювання з довжиною хвилі 290 нм, причому поглинання у області 230-290 нм обумовлено наявністю у макромолекулі білка ароматичних амінокислот, а також цистина [7, 17, 19].

Світло у *видимій області* спектра поглинається переважно хроматофорними групами білкових молекул, а також, частково, киснем. Найбільш важлива роль тут належить гемоглобіну, меланіну, ферментам, які містять мідь та залізо (каталаза, супероксиддесмутаза), ферментам окисно-відновного циклу, цитохромам із максимумами поглинання 600 нм та 605 нм, пігментам та іншим речовинам.

На думку М. Ф. Гамалєї (1981), біологічна дія світла на живий організм пов'язана із поглинанням квантів світла певної довжини хвилі спеціальною фоторегулюючою системою, до складу якої входять пігменти групи порфіринів. Така взаємодія призводить до активації окисидантних систем із подальшою зміною структури та метаболізму РНК, ДНК, білків, що у свою чергу викликає зміну синтетичної активності клітин. Окрім того, існує думка, що завдяки наявності у кисню смуги поглинання поблизу 640 нм, він активно поглинає червоне світло та переходить у синглетний стан.

Кисень у синглетному стані зберігається лише мить, проте є високо реактивним медіатором біологічних процесів. Вплив синглетного кисню на клітинний метаболізм відбувається через зміну рівня вільних радикалів.

Синглетний кисень призводить також до зміни міжклітинної водної структури, що сприяє кращому наповненню крові киснем. В результаті пришвидшується синтез білків, РНК, ДНК, збільшується швидкість синтезу колагену та його попередників, змінюється кисневий баланс та активність окисно-відновних процесів [2, 15, 21, 28].

Про наявність у клітин спектрально-залежної фоточутливості свідчать також дані Т. Кагу зі співавторами (1982, 1989), які довели, що максимальна стимуляція синтезу ДНК у дослідах з опроміненням клітин червоним світлом спостерігалася при дозі 100 Дж/см² і ефект швидко знижувався при зміні дози у будь-яку сторону.

Основним поглинаючим компонентом при опроміненні біологічних тканин *інфрачервоним (ІЧ) лазерним випромінюванням* з довжиною хвилі 890 нм (ближній інфрачервоний діапазон) є кров.

Механізм дії ІЧ лазерного випромінювання (0,8-1,4 мкм) визначається його низькою енергією, нездатністю викликати виражений фотохімічний ефект. При поглинанні тканинами, ІЧ випромінювання перетворюється у теплову енергію вібрації молекул. Як наслідок різкого теплового розширення протоплазми клітин може виникнути гідродинамічний удар, який є вихідним імпульсом більш загальної дії ІЧ випромінювання. В результаті перебігу даних процесів різні біологічні сполуки переходять в активний стан або інактивуються. Встановлено, що світло у ближній ІЧ області спектра слабо поглинається меланіном, водою та іншими компонентами тканин, що обумовлює його високу проникність.

Таким чином, специфічність відповіді на дію лазерного випромінювання чітко проявляється у особливостях первинної відповіді (фотореакції) та послідовних етапів спряження, які запускаються в результаті локальних атомно-молекулярних змін. Після первинної резонансної абсорбції

енергії кванта світла або розподілу поглиненої енергії між збудженими станами окремих атомних груп виникають конформаційні перебудови макромолекул. Результатом цього може бути зміна активності ключових ферментів тканинного метаболізму та мікроархітектоники клітинних мембран [11, 12, 14, 16, 19, 26].

Механізми реалізації біостимулюючого ефекту НІЛВ на клітинному рівні.

Т. Кагу зі співавторами виділяють *первинні* (відбуваються безпосередньо під час опромінення) та *вторинні* (темнові) механізми впливу НІЛВ на клітину.

До *первинних механізмів* дії світла на клітину відносять:

прискорення переносу електронів по дихальному ланцюгу завдяки зміні редокс-властивостей його компонентів при фотозбудженні їх електронних станів;

звільнення монооксиду нітрогену (NO), який є модулятором активності цитохром-с-оксидази;

збільшення концентрації супероксидного аніона в результаті активації дихального ланцюга; посилення генерації синглетного кисню;

індукована локальним нагрівом хромофорів зміна біохімічної активності.

Локальне короткочасне підвищення температури біомолекул, які поглинають світло, може викликати структурні (конформаційні) зміни та запускати такі біохімічні процеси, як активація або інгібування ферментів. Як відмічає М. А. Каплан, лазерне випромінювання здатне призводити до суттєвої неоднорідності температурного градієнту в тканинах, особливо на рівні однієї клітини та її органел. Це може помітно впливати на константи швидкості біохімічних реакцій, призводити до деформації клітинних мембран, зміни їх електричних потенціалів тощо. Тут чітко простежується ланцюг причинно-наслідкових зв'язків у розумінні природи лікувального або біостимулюючого ефекту низькоінтенсивного лазерного випромінювання [9, 25, 27].

Вторинні (темнові) клітинні механізми реалізуються після поглинання світла у мітохондріях та не потребують подальшої активації світлом. Вторинні реакції пов'язані з короткочасною зміною у параметрах клітинного гомеостазу. До них належать:

збільшення внутрішньоклітинної концентрації АТФ;

активація Na^+ , K^+ - АТФ-ази;

збільшення внутрішньоклітинної концентрації Ca^{2+} ;

зміна концентрації цАМФ;

активація трансмембранних йонних потоків;

деполяризація клітинної мембрани.

Існує декілька груп теорій, які намагаються пояснити механізм дії низькоінтенсивного лазерного випромінювання на клітинному рівні.

Згідно з *першою групою теорій (біофізичною)*, вважається, що лазерне випромінювання (електромагнітні хвилі) взаємодіє з електричними полями клітин, і фотоефект обумовлюється первинним поглинанням кванта світла молекулою-акцептором та переходом її у збуджений стан. При цьому виникає різниця потенціалів між ділянками об'єкту, який опромінюється, а фотоелектрорушійна сила активує фізіологічні процеси.

Згідно з *другою групою теорій (фізичного та біохімічного рівнів впливу)* вважається, що механізм дії пов'язаний у першу чергу з фотоакцепцією ферментами (каталазою, цитохромоксидазним комплексом, нікотинамідфосфат (НАД)-оксидазою, глутатіон-S-трансферазою, глутатіонпероксидазою, дегідрогеназою, фосфатазою, НАДФ-дегідрогеназами), або речовинами, які містять у своєму складі йони металів (церулоплазміном, порфірином, гемоглобіном). Енергія лазерного випромінювання первинно поглинається цими ферментами, які переходять у активний стан і запускають систему антипероксидного захисту (АПЗ).

Ферменти відіграють роль зв'язку в обміні білків, вуглеводів, амінокислот та визначають нормальний перебіг енергетичних та метаболітичних процесів у клітині. Внаслідок цього аналіз фотоіндукованих змін активності ферментів дає цінну інформацію про первинні біохімічні механізми стимулюючої дії лазерного випромінювання низької інтенсивності на функціональну активність клітини.

Експериментальні дані свідчать про те, що під дією випромінювання гелій-неонового лазера ($\lambda = 632,8$ нм, червоний діапазон спектра) підвищується ефективність ферментів антиоксидантної системи: супероксиддесмутази, каталази, глутатіонпероксидази, глутатіонредуктази [2, 3, 4, 10, 15].

Третя група теорій (молекулярно-структурних змін клітинних мембран) уточнює локалізацію впливу, який описується гіпотезами другої групи. Існує два механізми дії лазера на плазматичну мембрану: акцепція та рецепція квантів світла. До них відносять:

фотохімічні зміни;

стимуляція мікроциркуляції;

стимуляція мітохондрій;

активація роботи трансмембранних йонних каналів;

зниження вмісту пірвіноградної кислоти у еритроцитах;

зменшення вмісту Ca^{2+} у еритроцитах;

збільшення мітотичного індексу;

підвищення фагоцитарної активності лейкоцитів;

підвищення вмісту імуноглобулінів G та T-лімфоцитів.

При цьому проходить активація антиоксидантної системи, розвивається системний вегетативний ефект у вигляді відносного послаблення активності симпатичної системи, що створює антишемічний ефект.

Експериментально виявлені зміни проникності та структурного стану мембран лізосом, сітківки ока, нейронів, мікросом, мітохондрій, під впливом гелій-неонового лазера [11, 20].

М. Д. Девятков зі співавторами (1981) пояснюють зміни фагоцитарної активності лейкоцитів та розеткоутворюючої активності T- і B-лімфоцитів під дією НЛВ змінами фізико-хімічного стану клітинних мембран та особливостями примембранних шарів (глікокалікса).

Біостимулюючий ефект інфрачервоного лазерного випромінювання ряд авторів пояснюють локальним збільшенням температури клітинних мембран. При цьому виникає градієнт температури у навколосмембранних областях. Це викликає термодифузійний відтік йонів калію та натрію від мембрани. При цьому, зокрема, збільшується довжина екранування мембранного потенціалу. Останнє призводить до розкриття білкових каналів, які обумовлюють активний транспорт йонів та полярних молекул, посилює процеси ендоцитозу. В результаті термодифузійного відтоку йонів Na^+ та K^+ змінюється електрохімічний баланс, підвищується енергія клітини.

Ефект оптичної термодифузійної активації, можливо, притаманний також лазерному випромінюванню видимого діапазону спектра, оскільки при використанні гелій-неонового лазерного випромінювання відмічається підвищення електрокінетичного потенціалу мембрани еритроцитів, яке супроводжується активацією натрієвих насосів. При цьому проходить ліквідація прихованого енергетичного дефіциту клітини.

Під впливом НЛВ відбувається збільшення кількості еритроцитів та ретикулоцитів, спостерігається посилення мітотичної активності клітин кісткового мозку, знижується ШОЕ (швидкість осідання еритроцитів). Такий вплив на кровотворення відбувається внаслідок прямої та побічної дії. У першому випадку світло, яке генерується лазером, поглинається порфірином еритроцитів та призводить до зниження їх резистентності та розпаду незначної їх частини. Продукти розпаду, очевидно, активують кровотворення у кістковому мозку. Побічна дія лазерного випромінювання реалізується внаслідок активізації діяльності ендокринних залоз, перед усім гіпофізу та щитовидної залози, які мають

безпосереднє відношення до регуляції функції кровотворення [1, 11, 12, 14].

Вплив НЛВ на тканинному та органному рівнях. Особливістю низькоінтенсивного лазерного випромінювання як терапевтичного фактора є його стимулююча дія на процеси регенерації тканин, у основі якої лежить інтенсифікація проліферації клітин.

Експериментальні дані свідчать про прискорення регенерації під впливом НЛВ різних довжин хвиль кісткової, сполучної та епітеліальної тканин. Доведена також позитивна дія лазерного випромінювання на приживлення трансплантатів шкіри та кісток, на регенерацію опромінених іонізуючою радіацією скелетних м'язів та їх трансплантантів.

Слід відмітити стимулюючу дію багаторазового опромінення світлом гелій-неонового лазера на регенерацію нервової тканини та життєздатність ізольованих тканин.

При лазерному впливі відбувається більш активна регенерація епідермісу з відновленням усіх його шарів та розвиток молоді, добре васкуляризованої сполучної тканини у місцях пошкодження шкіри, що пов'язано з інтенсивним розвитком мікроциркуляторного русла під дією НЛВ та протизапальним ефектом даного фактора.

У основі протизапальної дії червоного лазерного випромінювання низької інтенсивності покладені наступні тканинні процеси:

- посилення тканинного дихання;
- збільшення інтенсивності обмінних процесів у тканинах;
- підвищення утилізації кисню тканинами;
- нормалізація проникності судинно-тканинних бар'єрів;
- посилення проліферативних процесів у сполучній тканині.

Відмічений також позитивний вплив випромінювання гелій-неонового лазера на окисно-відновні процеси, які відіграють важливу роль у процесі регенерації та репарації тканин [2, 15, 19].

Багатьма авторами вивчається вплив лазерного випромінювання на процеси мікроциркуляції при різних захворюваннях. Активація мікроциркуляції розглядається як механізм підвищення стійкості тканин до гіпоксичних станів. Внутрішньоклітинна гіпоксія відноситься до загальних патогенетичних ланцюгів різних захворювань та призводить до таких важких наслідків для організму як:

- зниження енергетичного потенціалу організму;
- активація пероксидного окислення ліпідів;
- порушення клітинного метаболізму та функціонування мітохондрій;
- пошкодження мембранно-клітинних структур;

перетворення адаптаційних реакцій у патологічні.

Результати досліджень показали, що у основі біостимулюючої дії на мікроциркуляцію НІЛВ червоної та ближньої інфрачервоної областей спектру лежать два процеси:

Власне посилення гемоциркуляції (активація роботи міоцитів та ендотеліоцитів; дилатація капілярів, яка призводить до підвищення їх функціональної активності; розкриття резервних капілярів);

Активація новоутворення капілярів (неоваскулогенез).

Експериментальні дані свідчать про участь у реакціях організму на лазерне опромінення молекулярно-пептидних регуляторів та нейропептидів, які контролюють усі функції організму, а також калікреїн-хінінової системи, продукти активації якої (кініни) є регуляторами тону та рівня мікроциркуляторних процесів у тканинах.

В результаті коригуючої та біостимулюючої дії НІЛВ на молекулярному, клітинному та тканинному рівнях *організації відбувається нормалізація функції органа або системи органів, які втягнуті в патологічний процес* [6, 18, 24].

Ефекти впливу НІЛВ на системному та організаційному рівнях. Багаторічні дослідження

лікарів, біологів, біофізиків, біохіміків довели, що лазерне випромінювання володіє унікальними терапевтичними можливостями. Цей ефект досягається завдяки коригуючій дії на всі регуляторні системи організму – імунну, ендокринну, ЦНС. При цьому лазерне випромінювання не викликає побічних ефектів. Механізми реалізації лікувальної дії НІЛВ забезпечують інтегрований вплив на функціонування усіх систем організму, нормалізуючи їх роботу та забезпечуючи сумарну комплексну відповідь організму [8, 18, 22].

Висновки

Взаємодія НІЛВ з біологічними об'єктами специфічна, і специфічність лазерного ефекту визначається перед усім довжиною хвилі випромінювання;

Реалізація біоефекту НІЛВ починається з моменту поглинання енергетичного кванта фоточутливою біомолекулою;

Для кожної довжини хвилі НІЛВ існують молекули, які найбільш ефективно його поглинають;

Відповідь субклітинних структур, клітини, тканини, органу та організму на дію НІЛВ являє собою інтегральну, цілісну, системну реакцію.

1. Александров М.Т., Якухина З.И., Зайцев В.П. и др. Некоторые вопросы изучения механизма стимулирующего действия гелий-неонового лазера. – В кн.: Результаты экспериментальных и клинических исследований. – М., 1976. – С. 4-6.
2. Атчабаров Б.А., Бойко З.Ф. К механизму лечебного действия монохроматического красного света низкой интенсивности / Вопросы курортологии. – 1980. - № 6. – С. 5-9.
3. Байбеков И.М., Мусаев Э.Ш. Влияние гелий-неонового лазера на ультраструктуру клеток и пролиферацию эпителия двенадцатиперстной кишки // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 1983. - № 3. – С. 95-98.
4. Беляева Ю.В. Влияние лазерного излучения на синтез ДНК и деление клеток человека // Вестник АН БССР. Сер. физ.-хим. наук. – 1981. - № 3. – С. 73-75.
5. Богущ Н.А., Мостовников В.А., Мохорева С.И. и др. О механизме общестимулирующего действия лазерного излучения // Докл. АН БССР. – 1977. – Т. 21, № 8. – С. 759-762
6. Бриль Г.Е. Молекулярно-клеточные основы терапевтического действия низкоинтенсивного лазерного излучения. – Саратов, 2000.
7. Бриль Г.Е. Некоторые методологические аспекты изучения биологических эффектов низкоинтенсивного лазерного излучения // Фотобиология та фотомедицина. 2007 – Т. V, № 1. – С. 5-13.
8. Жуков Б.Н., Лысов Н.А., Анисимов В.И. Лазерные технологии в медицине: Монография – Самара: СамГМУ, 2001. – 224 с.
9. Захаров С.Д., Скопинов С.А., Чудновский В.М. Первичные механизмы воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения в биологических системах: Слабопоглощающие фотоакцепторы и структурное усиление локального воздействия в биологических жидкостях // Лазеры и медицина: Тез. докл. междунар. конф. (Ташкент, 1989). – М., 1989. – Ч. 1. – С. 81-82.
10. Зубкова С.М. О механизме биологического действия излучения гелий-неонового лазера // Биологические науки. – 1987. - № 7. – С. 30-37.
11. Кадников О.Г., Товстях В.В. Изучение воздействия излучения лазера на проводимость биомолекулярных фосфолипидных мембран. – В кн.: Проблемы биоэнергетики организма и стимуляции лазерным излучением. – Алма-Ата, 1976. – С. 25.
12. Каплан М.А., Степанов В.А., Воронина О.Ю. Физико-химические основы действия лазерного излучения в ближней ИК области на биоткани // Лазеры и медицина: Материалы междунар. конф. (Ташкент, 1989). – М., 1989. – С. 85-86.
13. Кару Т. Клеточные механизмы низкоинтенсивной лазерной терапии // Лазерная медицина. – 2001. – Т. 5, № 1. – С. 7-15.
14. Климанов М.Е., Северская Л.П., Карпицкая В.С. Низкоинтенсивная инфракрасная лазерная терапия: Метод. Пособие / Под ред. М.А. Каплана. – Обнинск, 1993. – 74 с.
15. Кутателадзе И.О. Влияние излучения гелий-неонового лазера на биологическую активность сенсорной зоны коры головного мозга кролика / Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. – 1976. - № 5. – С. 64-66.
16. Лобазов А.Ф. Влияние лазерного излучения на содержание нуклеиновых кислот в клетках человека. – В кн.: Применение лазерного излучения и магнитного поля в биологии и медицине. – Минск, 1982. – С. 55-56.
17. Марсагишвили Л.А. Клиническая эффективность низкоинтенсивной лазерной терапии // Лазерная медицина. – 2004. - № 8(4). – С. 45-48.

18. Никитин А.В., Есауленко И.Э., Васильева Л.В. Низкоинтенсивное лазерное излучение в практической медицине. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. – 190 с.
19. Павлюст Л.П. Влияние НИЛИ на липиды крови, гепатоцитов и эритроцитов. – Львов, 1988.
20. Попов В.И. Воздействие лазерного излучения на митотическую активность гепатоцитов регенерирующей печени // Вопросы курортологии. – 1980. - № 6. – С. 10-12.
21. Попов В. Д. Современные аспекты квантовой терапии в клинической медицине. К. – 1996, - 133 с.
22. Тучин В.В. Основы взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения с биотканями: дозиметрический и диагностический аспекты // Известия Академии наук, серия физическая. – 1995. – Т. 59, № 6. – С. 120-143.
23. Ченских Е.П., Ни З.И., Туркебаева К.А., Николенко Н.К. Морфологические изменения в тканях животных под воздействием различных экспозиций монохроматического красного света // Здравоохранение Казахстана. – 1975. - № 5. – С. 49-50.
24. Шульгина Н.С., Чегин П.П., Привалов А.П. Функциональное состояние лимфоидных клеток после облучения низкоинтенсивным лазерным излучением. – В кн.: Применение средств и методов лазерной техники в биологии и медицине. – К., 1981. – С. 176-178.
25. Bouchand E., Daoud M. Reflection of light by random layered system // J. Phys. (Fr.) – 1986. – Vol. 47, № 9. – P. – 1467-1475.
26. Hillenkamp F. Interaction between laser radiation and biological systems // Lasers in Biology and Medicine/ - New York; London, 1987. – P. 36-75.
27. Karu T.I. Photobiology of low-power laser therapy. – London: Harwood, Acad. Publ., 1989.
28. Kashima-Tanaka M., Tsujimoto Y., Kawamoto K. et al. Generation of free radicals and/or active oxygen by light or laser radiation in pigment-free aerobic systems // J. Endod. – 2003. Vol.29, № 2. – P. 141-143.
29. Nicola R. A., Jorgetti V., Rigau J. et al. Effect of low-power GaAlAs laser (660 nm) on bone structure and cell activity: an experimental animal study // Lasers Med. Sci. — 2003. Vol. 18, N 2. —P. 89-94.
30. Oshiro T. Low level laser therapy: a practical introduction / T. Oshiro, R. G. Calderhead. – New-York: Chichester, 1988.
31. Simunovic Z., Ivankovich A. D., Depolo A. Wound healing of animal and human body sport and traffic accident injuries using low-level laser therapy treatment: a randomized clinical study of seventy-four patients with control group//J. Clin. Laser. Med. Surg. - 2000. Vol. 18, N2. - P. 67-73.

Отримано: 3 вересня 2008 р.

Прийнято до друку: 17 квітня 2009 р.